



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

# **BIOGEOQUÍMICA DEL SISTEMA ROCA-SUELO-PLANTA EN CUATRO VIÑAS DE CHILE CENTRAL (33°-36°S): INFLUENCIAS LITOGÉNICAS, PEDOGENÉTICAS Y ANTRÓPICAS**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA EN CIENCIAS MENCIÓN GEOLOGÍA

**PAMELA IVONNE CAROLINA CASTILLO LAGOS**

**PROFESOR GUÍA:**

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

**PROFESOR CO-GUÍA:**

IGNACIO SERRA STEPKE

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

KATJA DECKART

FELIPE ABURTO GUERRERO

SANTIAGO DE CHILE

2019

## RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE:

Doctora en Ciencias mención Geología

**POR:** Pamela Castillo Lagos

**FECHA:** Diciembre 2019

**PROFESOR GUÍA:** Brian Townley Callejas

### **BIOGEOQUÍMICA DEL SISTEMA ROCA-SUELO-PLANTA EN CUATRO VIÑAS DE CHILE CENTRAL (33°-36°S): INFLUENCIAS LITOGÉNICAS, PEDOGENÉTICAS Y ANTRÓPICAS**

Con el objetivo de determinar la influencia del material parental y de la actividad antrópica, en la química de suelos y frutos en cultivos de vid, se seleccionaron cuatro viñedos en distintas latitudes de Chile Central, en los sectores de Casablanca, San Antonio, Santa Cruz y San Javier. Los viñedos presentan contextos geológicos diferentes, pero con un manejo agronómico similar. El estudio se realizó a escala de microcuenca, obteniendo como datos la geoquímica y mineralogía de las rocas parentales, así como la hidroquímica de aguas lluvia y subterráneas de cada cuenca. Además en cada viñedo se midió la hidroquímica de aguas de riego y se realizaron estudios a nivel de cuartel implementando doce calicatas bajo plantas seleccionadas y calicatas en zonas no cultivadas, en las que se analizó la física, fisicoquímica, geoquímica y mineralogía de los suelos y la química de frutos. La biogeoquímica de cada área, fue abordada mediante el análisis de tres grupos de elementos: *Tierras raras (REE)*, para trazar los sistemas roca-suelo y evaluar procesos pedogenéticos; *Nutrientes*, para analizar las relaciones biogeoquímicas entre roca-suelo-agua-fruto y *Metales*, para determinar sus concentraciones en los sistemas roca-suelo-agua y evaluar eventuales procesos de contaminación.

La comparación entre las rocas parentales y los suelos desarrollados, mostraron evidentes similitudes mineralógicas entre ambas matrices, con un notorio aumento de minerales de arcilla en todos los suelos. En la geoquímica de las REE se observan patrones afines entre roca y suelo. Sin embargo, para suelos ubicados en pendientes fuertes, el patrón es modificado, con un empobrecimiento preferencial de MREE y HREE, indicando la mayor movilidad de estos elementos y su lixiviación debido al flujo pendiente abajo de las aguas. Para los nutrientes y metales, la comparación en la química total de rocas parentales y suelos, muestra patrones diferentes en cada viña. En Casablanca similares patrones en nutrientes y metales, pero con notorio aumento de Cu en el suelo. La viña de San Antonio es la que posee las mayores concentraciones en la mayoría de nutrientes y metales, sin embargo, los patrones son similares para todos los elementos entre la roca y los suelos. En Santa Cruz se reconoce un empobrecimiento del suelo en Ca y Mg, con enriquecimiento de Hg y As. Mientras que en San Javier existe un notorio enriquecimiento del suelo en casi todos los nutrientes y metales, con excepción de K, Mo, Sn y Hg. En la fase biodisponible los elementos tienen un comportamiento fuertemente influenciado por los procesos pedogenéticos y por el pH del suelo, con bajas concentraciones para Al, Fe y LREE, los cuales son retenidos en fases estables el suelo. En la química del fruto se distingue que K, P, Ca, Mg y Na, tienen una acumulación modulada por la fisiología de la planta, mientras que Fe, Mn, Cu y Zn, muestran un comportamiento marcado por la química del suelo y del medioambiente del viñedo.

La influencia antrópica es interpretada a través de la comparación de suelos cultivados y no cultivados, en los que se reconocen cambios en las condiciones de pH y conductividad eléctrica, diferencias en la mineralogía y en la abundancia de determinados metales, nutrientes y en la suma de REE. Por otra parte, altas concentraciones de nutrientes y metales en las aguas que ingresan al suelo (aguas de lluvia y riego) indican la influencia del uso de agroquímicos y de la deposición atmosférica. Por último, diferencias en las condiciones de pH, bajos valores de REE totales y desaparición de vermiculita en suelos cultivados plantean la hipótesis de que el manejo agrícola generaría un aumento de la tasa de meteorización de los suelos.

Los resultados de esta tesis proponen que estas metodologías de análisis y estudio integrado de microcuencas, podrían aportar a un manejo agrícola más eficiente, disminuyendo el uso de agroquímicos y consumo de agua, enfocados hacia una viticultura de mayor precisión espacial.

Para Vera... y su luz

Amor,  
Se no va la vida...  
Ven vamos a buscar entonces  
Toda la ternura, toda la hermosura,  
Tesoros del alma.

Somos hijos de la tierra  
Y su palabra es nuestra historia,  
Somos hijos de la tierra.

Somos hijos de la tierra  
Y su palabra es nuestra historia,  
Somos hijos de la tierra.

Hijos de la tierra  
Eduardo Parra, Los Jaivas



## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi profesor guía Brian Townley, por pensar diferente, por creer en mis ideas, por su confianza y su optimismo a toda prueba, por apañar siempre y su amistad. A mi profesor co-guía Ignacio Serra por su generosidad, por enseñarme acerca de la vitivinicultura, por ser sencillo, por apoyarme, por su amistad, por su trabajo en terreno y su buena onda. A Felipe Aburto por interesarse en este proyecto de investigación, sus útiles comentarios y consejos, por ser un gran conocedor del suelo, compartir sus conocimientos y por motivarme a seguir aprendiendo. A los profesores Katja Deckard, Luisa Pinto, Jacobous Le-Roux, por sus comentarios y preguntas que fueron valiosos para repensar el trabajo. A Paulina Flores, Patricio Parra, Claudia Carbonell, Mauricio Mieres y Alejandra Soto del Consorcio I+D de Vinos de Chile por su apoyo en este proyecto, asimismo a los integrantes de los comités técnicos por su comentarios y aportes, en especial a don Víctor Costa y Jimena Balic.

De manera muy especial, quiero agradecer a tres personas que fueron clave en la ejecución de este trabajo, a Muriel Contreras, Sofía López y Eduardo Cortés, por su trabajo esforzado, por la amistad, por su energía milenial, por sus enseñanzas, por su alegría, por su cariño, por las risas, por los cansancios, por el frío, por el calor, por la lluvia, por el hambre, por meter las patas en el barro y por animarme en momentos difíciles. Junto con ellos quiero agradecer también a todos quienes trabajaron en terreno y soportaron largas horas de trabajo y algunos enojos, a Paulina Salgado, por su excelente trabajo y su buena onda, a Hugo Moreno por escuchar a Miles Davis en las calicatas; a Felipe Lagos y Valentina Maldonado en la geología; a los cosechadores de uva y hojas Laura Lagos, Jorge Heredia, Paola Lagos, Ignacio y Brian; por acompañarme a terreno en tiempos extras a Pablo Salas; por apañar en la logística a Francisco Hevia y Roberto Valles y a los alumnos de agronomía Carlos y Alfredo.

A quienes nos recibieron en sus casas, nos alimentaron y nos dieron cariño hogareño a Elsita Reyes, Héctor Salas y Chari Reyes de Longaví, a la Sra. Herminia y don Héctor de Santa Cruz y a la Dani en Casablanca. A quienes nos recibieron con amabilidad en las viñas, en especial a Roberto y Ruperto en San Antonio (mi viña favorita) y a don Hipólito y a Rosita en San Javier.

Agradecer a los funcionarios de la U de Chile por su apoyo, a Verónica Carrasco por las conversas y por hacer las cosas posibles, a Judith, a Jeannette, a William, a Maritza, a Blanca, a Rosita, a don Carlos, al Kilo, a Julio y a Roberto.

A mi madre Juanita, a mis hermanos Tania y Leo y mi padre Manuel, por ser la red de apoyo, por el amor incondicional y la pega extra. A mi tía Eliana por mostrarme una parte que no conocía de mí, amor para ti en donde estés. A mi prima Pao por estar siempre a mi lado. A la Camencho por todo el apoyo. A mis amigas del alma Karin, Andru, Glo, Gab, Noe, Jo, Yharu y Susi, gracias por existir, escucharnos y bla bla bla...

Finalmente a mi más querido Pablo por estos largos años de doctorado, que fueron difíciles y felices, en que aprendimos a conocernos mejor y nos prepararon para un nuevo camino con nuestra alegría Vera, gracias siempre por tu apoyo, tu amor y tu sonrisa.

## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 ANTECEDENTES CIENTÍFICOS .....	1
1.1.1 EL SUELO COMO SISTEMA DE ESTUDIO .....	1
1.1.2 METEORIZACIÓN DE ROCAS Y GÉNESIS DEL SUELO .....	2
1.1.3 ELEMENTOS ESENCIALES PARA EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS .....	2
1.1.4 BIODISPONIBILIDAD DE ELEMENTOS EN EL SUELO .....	3
1.1.5. RELACIÓN BIOGEOQUÍMICA SUELO-PLANTA .....	4
1.2 MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	6
1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	6
1.3.1 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS .....	6
1.3.2 HIPÓTESIS.....	7
1.3.3 PREGUNTAS CIENTÍFICAS.....	7
1.4 OBJETIVOS .....	7
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
1.5 ENFOQUE METODOLOGICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
1.6 UBICACIÓN Y ACCESOS DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO .....	8
1.7 TRABAJOS ASOCIADOS A LA INVESTIGACIÓN.....	10
CAPITULO 2. DISEÑO DE LA INVESTIGACION Y METODOLOGÍA .....	14
2.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	14
2.2 DISEÑO TEMPORAL DE LA INVESTIGACIÓN .....	15
2.3 METODOLOGÍA DE ESTUDIO A NIVEL DE MICROCUENCA .....	16
2.3.1 SELECCIÓN DE VIÑEDOS.....	17
2.3.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO A NIVEL DE MICROCUENCA.....	18
2.4 METODOLOGÍA DE ESTUDIO A NIVEL DE VIÑEDO.....	22
2.4.1 SELECCIÓN DE CUARTELES .....	22
2.4.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO EN PERFILES DE SUELOS.....	23
2.4.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA MUESTRAS DE AGUAS .....	33
2.4.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA MUESTRAS DE BAYAS .....	37
2.5 NUMERACIÓN DE MUESTRAS.....	38
2.6 METODOLOGÍAS ANALÍTICAS .....	38
CAPITULO 3. GEOLOGÍA Y GEOGRAFÍA DE LAS AREAS DE ESTUDIO .....	41
3.1 MARCO MORFOLÓGICO Y GEOGRÁFICO REGIONAL .....	41
3.2 GEOGRAFÍA Y GEOLOGÍA A NIVEL DE CUENCA EN CASABLANCA .....	42
3.2.1 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA DE CASABLANCA .....	42

3.2.2 GEOLOGÍA LOCAL (1:20.000) DE CASABLANCA.....	43
3.2.3 CLIMA DE CASABLANCA .....	46
3.2.4 HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DE CASABLANCA .....	47
3.2.5 SUELOS DE CASABLANCA.....	48
3.3 GEOGRAFÍA Y GEOLOGÍA A NIVEL DE CUENCA EN SAN ANTONIO .....	48
3.3.1 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA DE SAN ANTONIO.....	48
3.3.2 GEOLOGÍA LOCAL (1:20.000) DE SAN ANTONIO .....	50
3.3.3 CLIMA DE SAN ANTONIO .....	53
3.3.4 HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DE SAN ANTONIO.....	54
3.3.5 SUELOS DE SAN ANTONIO .....	55
3.4 GEOGRAFÍA Y GEOLOGÍA A NIVEL DE CUENCA EN SANTA CRUZ .....	55
3.4.1 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA DE SANTA CRUZ .....	55
3.4.2 GEOLOGÍA LOCAL (1:20.000) DE SANTA CRUZ .....	56
3.4.3 CLIMA DE SANTA CRUZ.....	59
3.4.4 HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DE SANTA CRUZ .....	60
3.4.5 SUELOS DE SANTA CRUZ.....	61
3.5 GEOGRAFÍA Y GEOLOGÍA A NIVEL DE CUENCA EN SAN JAVIER .....	62
3.5.1 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA DE SAN JAVIER .....	62
3.5.2 GEOLOGÍA LOCAL (1:20.000) DE SAN JAVIER .....	63
3.5.3 CLIMA DE SAN JAVIER.....	66
3.5.4 HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DE SAN JAVIER .....	68
3.5.5 SUELOS DE SAN JAVIER .....	69
3.6 TABLA RESUMEN DE LAS VIÑAS .....	70
CAPITULO 4. RESULTADOS .....	72
4.1 INTRODUCCION .....	72
4.2 CONTROL DE CALIDAD Y ANALISIS DE DATOS.....	72
4.2.1 CONTROL DE CALIDAD DE ANÁLISIS QUÍMICOS.....	72
4.2.2 ANÁLISIS DE DATOS .....	76
4.3 PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE ROCAS PARENTALES.....	77
4.4 RESULTADOS VIÑA DE CASABLANCA .....	80
4.4.1 GEOLOGÍA A ESCALA DE CUARTEL (1:5.000) EN CASABLANCA .....	80
4.4.2 FISICOQUIMICA DE SUELOS EN CASABLANCA .....	83
4.4.3 GEOQUÍMICA DE LOS SUELOS DE CASABLANCA .....	85
4.4.4 QUÍMICA DE FRUTOS EN CASABLANCA .....	91
4.4.5 HIDROQUÍMICA DE CASABLANCA .....	93
4.4.6 PERFILES DE SUELOS SELECCIONADOS EN CASABLANCA .....	97
4.5 RESULTADOS VIÑA DE SAN ANTONIO.....	103

4.5.1 GEOLOGÍA A ESCALA DE CUARTEL (1:5.000) EN SAN ANTONIO.....	103
4.5.2 FISICOQUIMICA DE SUELOS EN SAN ANTONIO.....	107
4.5.3 GEOQUIMICA DE LOS SUELOS DE SAN ANTONIO .....	109
4.5.4 QUÍMICA DE FRUTOS EN SAN ANTONIO .....	113
4.5.5 HIDROQUÍMICA DE SAN ANTONIO.....	116
4.5.6 PERFILES DE SUELOS SELECCIONADOS EN SAN ANTONIO .....	121
4.6 RESULTADOS VIÑA DE SANTA CRUZ .....	126
4.6.1 GEOLOGÍA A ESCALA DE CUARTEL (1:5.000) EN SANTA CRUZ .....	126
4.6.2 FISICOQUÍMICA DE SUELOS EN SANTA CRUZ .....	128
4.6.3 GEOQUIMICA DE LOS SUELOS DE SANTA CRUZ .....	130
4.6.4 QUÍMICA DE FRUTOS EN SANTA CRUZ .....	137
4.6.5 HIDROQUÍMICA DE SANTA CRUZ.....	139
4.6.6 PERFILES DE SUELO SELECCIONADOS EN SANTA CRUZ.....	143
4.7 RESULTADOS VIÑA DE SAN JAVIER .....	149
4.7.1 GEOLOGÍA A ESCALA DE CUARTEL (1:5.000) EN SAN JAVIER .....	149
4.7.2 FISICOQUIMICA DE SUELOS EN SAN JAVIER .....	151
4.7.3 GEOQUÍMICA DE LOS SUELOS DE SAN JAVIER .....	152
4.7.4 QUÍMICA DE FRUTOS EN SAN JAVIER .....	157
4.7.5 HIDROQUÍMICA EN SAN JAVIER.....	161
4.7.6 PERFILES DE SUELO SELECCIONADOS EN SAN JAVIER.....	165
CAPITULO 5. RELACIÓN GEOQUÍMICA ENTRE ROCA Y SUELO: ELEMENTOS DE LAS TIERRAS RARAS .....	171
5.1 INTRODUCCIÓN .....	171
5.2 ANALISIS DE DATOS.....	172
5.3 RESULTADOS .....	173
5.3.1 CONTROL DE CALIDAD .....	173
5.3.2 PATRONES DE REE EN ROCAS PARENTALES.....	174
5.3.3 GEOQUÍMICA DE REE EN CASABLANCA: RELACIÓN ROCA-SUELO.....	175
5.3.4 GEOQUÍMICA DE REE EN SAN ANTONIO: RELACIÓN ROCA-SUELO .....	179
5.3.5 GEOQUÍMICA DE REE EN SANTA CRUZ: RELACIÓN ROCA-SUELO .....	182
5.3.6 GEOQUÍMICA DE REE EN SAN JAVIER: RELACIÓN ROCA-SUELO .....	185
5.3.7 COMPARACIONES DE GEOQUÍMICA DE REE ENTRE VIÑAS .....	188
5.4 DISCUSIONES.....	188
5.4.1 REE COMO ELEMENTOS TRAZADORES DE LA LITOLOGÍA, METEORIZACIÓN Y PROCESOS PEDOGENÉTICOS.....	188
5.4.2 REE COMO ELEMENTOS TRAZADORES DE INTERVENCIÓN ANTRÓPICA .....	194
CAPITULO 6. RELACIÓN BIOGEOQUÍMICA DEL SISTEMA ROCA-SUELO-AGUA-PLANTA: NUTRIENTES MINERALES ESENCIALES.....	197

6.1 INTRODUCCIÓN .....	197
6.2 PUBLICACIÓN CIENTÍFICA “Biogeochemistry of plant essential mineral nutrients across rock, soil, water and fruits in vineyards of Central Chile” .....	197
ABSTRACT .....	198
1. INTRODUCTION .....	198
2. METHODOLOGY .....	200
2.1 VINEYARD SELECTION, GEOLOGICAL MAPPING AND ROCK SAMPLING .....	200
2.2 STUDY SITES .....	201
2.3 SELECTION AND MAPPING OF PLOTS .....	202
2.4 SOIL, WATER AND FRUIT SAMPLING .....	202
2.5 CHEMICAL ANALYSIS .....	206
2.6 DATA ANALYSIS.....	207
3 RESULTS AND DISCUSSIONS .....	208
3.1 DISTRIBUTION OF ESSENTIAL NUTRIENTS IN ROCK AND SOILS .....	208
3.2 DISTRIBUTION OF ESSENTIAL NUTRIENTS IN WATERS .....	213
3.3 ROCK-SOIL-ENVIRONMENT GEOCHEMICAL RELATIONSHIP.....	211
3.4 DISTRIBUTION OF ESSENTIAL NUTRIENTS IN THE BERRIES.....	214
3.5 SOIL-BERRY BIOGEOCHEMICAL RELATIONSHIP .....	218
3.6 INTEGRATION OF THE ROCK-WATER-BERRY INTERPHASE .....	218
4. CONCLUSIONS .....	221
5. ACKNOWLEDGMENTS.....	222
CAPÍTULO 7. CONTENIDO DE METALES EN SUELOS Y AGUAS .....	223
7.1 INTRODUCCIÓN .....	223
7.2 ANALISIS DE DATOS.....	223
7.3 COMPARACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES ENTRE VIÑAS .....	224
7.3.1 METALES EN LA QUÍMICA DE SUELO TOTAL.....	224
7.3.2 METALES EN LA FASE BIODISPONIBLE DEL SUELO.....	226
7.3.3 METALES EN AGUAS .....	229
7.4 DISCUSIÓN.....	233
7.4.1 CONTENIDO DE METALES EN SUELOS CULTIVADOS Y NO CULTIVADOS .....	233
7.4.2 DISTRIBUCIÓN DE METALES EN LAS VIÑAS EN ESTUDIO .....	234
CAPITULO 8. DISCUSIONES GENERALES .....	240
8.1 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS .....	240
8.1.1 LEVANTAMIENTO GEOLÓGICO .....	240
8.1.2 MONITOREO ESTACIONAL Y ANUAL DE VIÑEDOS.....	241
8.1.3 EVALUACIÓN ACTIVIDAD ANTRÓPICA.....	243
8.1.4 SELECCIÓN DE SUELOS NO CULTIVADOS.....	243

8.1.5 METODOLOGÍA ANALÍTICA .....	244
8.2 MINERALOGÍA DE LOS SUELOS .....	245
8.2.1 MINERALES DE ARCILLAS Y ASPECTOS ANALÍTICOS.....	245
8.2.2 MINERALOGÍA DE LA ROCA PARENTAL Y LOS SUELOS .....	246
8.2.3 INFLUENCIA DE LA MINERALOGÍA EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO .....	248
CAPITULO 9. CONCLUSIONES.....	252
GLOSARIO.....	257
BIBLIOGRAFÍA.....	259
ANEXOS DIGITALES.....	272

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 2

Tabla 2.1. Características de las viñas seleccionadas para la investigación.	18
Tabla 2.2. Detalle de las campañas de terreno del levantamiento geológico.	19
Tabla 2.3. Detalles de las mediciones de nivel freático y muestreo de aguas subterráneas.	21
Tabla 2.4. Características de los cuarteles seleccionados.	23
Tabla 2.5. Fechas de las campañas de terreno para medición y muestreo de suelos.	26
Tabla 2.6. Detalles de los muestreos de suelos en las campañas de veranos 2015 y 2016.	30
Tabla 2.7. Detalle y fechas de las mediciones y muestreo de aguas de lluvia y de riego.	34
Tabla 2.8. Fecha de muestreo y número de muestras en muestreo de bayas.	37
Tabla 2.9. Sistematización de la numeración de muestras.	38
Tabla 2.10. Descripción de las metodologías analíticas utilizadas en la investigación.	39

### CAPÍTULO 3

Tabla 3.1. Precipitaciones totales y valores promedio de temperatura en Casablanca.	47
Tabla 3.2. Piezometría y dirección de flujo de las aguas subterráneas de Casablanca.	47
Tabla 3.3. Precipitaciones totales y valores promedio de temperatura en San Antonio.	54
Tabla 3.4. Piezometría y dirección de flujo de las aguas subterráneas de San Antonio.	54
Tabla 3.5. Precipitaciones totales y valores promedio de temperatura en Santa Cruz.	60
Tabla 3.6. Piezometría y dirección de flujo de las aguas subterráneas de Santa Cruz.	61
Tabla 3.7. Precipitaciones totales y valores promedio de temperatura en San Javier.	67
Tabla 3.8. Piezometría y dirección de flujo de las aguas subterráneas de San Javier.	69
Tabla 3.9. Tabla comparativa de la geografía, geomorfología y geología de las cuatro viñas.	70

### CAPÍTULO 4

Tabla 4.1. Resumen de variables confiables según el control de calidad.	76
Tabla 4.2. Mineralogía y textura de las rocas parentales.	78
Tabla 4.3. Estadísticas de las condiciones fisicoquímicas del suelo, viña en Casablanca.	83
Tabla 4.4. Estadísticas del contenido de MO y CIC de los suelos, viña en Casablanca.	102
Tabla 4.5. Estadísticas de las condiciones fisicoquímicas del suelo, viña en San Antonio.	107
Tabla 4.6. Estadísticas del contenido de MO y CIC de los suelos, viña en San Antonio.	125
Tabla 4.7. Estadísticas de las condiciones fisicoquímicas del suelo, viña en Santa Cruz.	129
Tabla 4.8. Estadísticas del contenido de MO y CIC de los suelos, viña en Santa Cruz.	148
Tabla 4.9. Estadísticas de las condiciones fisicoquímicas del suelo, viña en San Javier.	152
Tabla 4.10. Estadísticas del contenido de MO y CIC de los suelos, viña en San Javier.	169

### CAPÍTULO 5

Tabla 5.1. Resumen comparativo de los resultados de REE en la química de suelo total.	189
Tabla 5.2. Resumen comparativo de los resultados de REE en la fase biodisponible.	190

### CAPÍTULO 6

Table 1. Geology and geography of the four vineyards.	203
Table 2. Geomorphology, parent materials and soil classification (USDA) of studied plots.	204
Table 3. Factor Analysis (FA) results for the studied vineyards.	219

### CAPÍTULO 8

Tabla 8.1. Contenido de MO, CIC, proporción relativa de arcilla, relación arcilla/arena, proporción de minerales de arcilla, pH y CE del suelo, en las cuatro viñas.	249
--	-----

# ÍNDICE DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1

- Fig. 1.1. Estado de estabilidad de las fases en los suelos. 5
- Fig. 1.2. Ubicación y accesos de las cuatro áreas de estudio. 9

## CAPÍTULO 2

- Fig. 2.1. Gráfico y esquema con los sistemas y matrices considerados en la investigación. 14
- Fig. 2.2. Diseño experimental del trabajo progresivo en cuatro viñas piloto. 16
- Fig. 2.3. Modalidad de realización de calicatas en temporadas invierno y verano. 16
- Fig. 2.4. Concepto de hilera y espaldera. 17
- Fig. 2.5. Fotografías del trabajo en terreno para el levantamiento geológico. 20
- Fig. 2.6. Medición de nivel freático en pozos y muestreo de agua subterránea. 21
- Fig. 2.7. Posicionamiento de las calicatas dentro y fuera del viñedo. 24
- Fig. 2.8. Fotografías de mediciones fisicoquímicas. 27
- Fig. 2.9. Fotografías del muestreo geoquímico para elementos biodisponibles. 29
- Fig. 2.10. Muestreo de suelo para análisis geoquímico total en horizontes o niveles. 31
- Fig. 2.11. Muestreo de terrones y embalaje de muestras para análisis físico y químico. 33
- Fig. 2.12. Colectores de agua lluvia y esquema de colectores. 34
- Fig. 2.13. Colectores de agua lluvia instalados en la temporada Invierno 2015. 35
- Fig. 2.14. Materiales para mediciones fisicoquímicas y muestreo de aguas. 36
- Fig. 2.15. Muestreo de aguas de riego desde goteros y desde tranques. 37
- Fig. 2.16. Muestreo de bayas para análisis químico y bioquímico. 38

## CAPÍTULO 3

- Fig. 3.1. Ubicación y contexto regional de las viñas en estudio. 41
- Fig. 3.2. Pendientes y red de drenaje de la microcuenca en el sector de Casablanca. 42
- Fig. 3.3. Mapa geológico del entorno de la viña de Casablanca. 44
- Fig. 3.4. Fotografías de las unidades litológicas de Casablanca. 45
- Fig. 3.5. Gráfico con precipitaciones y temperatura en el área de Casablanca. 46
- Fig. 3.6. Pendientes y red de drenaje de la microcuenca en el sector de San Antonio. 49
- Fig. 3.7. Mapa geológico del entorno de la viña de San Antonio. 51
- Fig. 3.8. Fotografías de las unidades litológicas de San Antonio. 52
- Fig. 3.9. Gráfico con precipitaciones y temperatura en el área de San Antonio. 53
- Fig. 3.10. Pendientes y red de drenaje de la microcuenca en el sector de Santa Cruz. 56
- Fig. 3.11. Mapa geológico del entorno de la viña de Santa Cruz. 57
- Fig. 3.12. Fotografías de las unidades litológicas de Santa Cruz. 58
- Fig. 3.13. Gráfico con precipitaciones y temperatura en el área de Santa Cruz. 60
- Fig. 3.14. Pendientes y red de drenaje de la microcuenca en el sector de San Javier. 63
- Fig. 3.15. Mapa geológico del entorno de la viña de San Javier. 64
- Fig. 3.16. Fotografías de las unidades litológicas de San Javier. 65
- Fig. 3.17. Gráfico con precipitaciones y temperatura en el área de San Javier. 67

## CAPÍTULO 4

- Fig. 4.1. Gráficos multielemento de nutrientes y metales de las rocas parentales. 79
- Fig. 4.2. Cuartel Piedemonte de la viña de Casablanca. Mapa geológico a escala cuartel. 80
- Fig. 4.3. Calicatas VP-1, VP-2 y VP-3, Cuartel Piedemonte, viña de Casablanca. 81



Fig. 4.4. Calicatas VP-4, VP-5 y VP-6, Cuartel Piedemonte, viña de Casablanca.	81
Fig. 4.5. Cuartel Cerro de la viña de Casablanca. Mapa geológico a escala cuartel.	82
Fig. 4.6. Calicatas VC-8, VC-10, VC-11 y VC-12, Cuartel Cerro, viña de Casablanca.	82
Fig. 4.7. Calicata VC-9 y calicata VC-7, Cuartel Cerro, viña de Casablanca.	83
Fig. 4.8. Gráficos de caja y probabilidad con parámetros fisicoquímicos de Casablanca.	84
Fig. 4.9. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes en suelo total en Casablanca.	86
Fig. 4.10. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes biodisponibles en Casablanca.	88
Fig. 4.11. Gráficos de caja con contenidos de metales en suelo total en Casablanca.	89
Fig. 4.12. Gráficos de caja con contenidos de metales biodisponibles en Casablanca.	90
Fig. 4.13. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes en los frutos de Casablanca.	92
Fig. 4.14. Gráficos de caja con contenidos de metales en los frutos de Casablanca.	93
Fig. 4.15. Parámetros fisicoquímicos CE, T°, pH y Eh en las aguas de Casablanca.	94
Fig. 4.16. Contenidos de nutrientes en las muestras de aguas de Casablanca.	95
Fig. 4.17. Contenidos de metales en las muestras de aguas de Casablanca.	96
Fig. 4.18. Ubicación de calicatas seleccionadas en la viña de Casablanca.	98
Fig. 4.19. Gráfico de barra con la mineralogía de las rocas Tonalita de Casablanca.	98
Fig. 4.20. Gráficos de barra con la mineralogía de los perfiles de suelos de Casablanca.	99
Fig. 4.21. Gráficos de barra con la mineralogía de arcillas en suelos de Casablanca.	101
Fig. 4.22. Contenido de MO, CIC, arcillas y densidad aparente en suelos de Casablanca.	102
Fig. 4.23. Cuarteles Terraza y Pendiente de la viña de San Antonio.	103
Fig. 4.24. Mapa geológico a escala cuartel de viña en San Antonio.	104
Fig. 4.25. Calicata CT-1, Calicata CT-8 y Arenisca. Cuartel Terraza, viña de San Antonio.	104
Fig. 4.26. Calicatas CT-2, CT-4, CT-6, CT-7 y CT-9. Cuartel Terraza, viña de San Antonio.	105
Fig. 4.27 Calicatas CT-3 y CT-5. Cuartel Terraza, viña de San Antonio.	105
Fig. 4.28. Calicatas CP-10, CP-11 y CP-12 del cuartel Pendiente, viña de San Antonio.	106
Fig. 4.29. Detalle de calicata CT-10 del cuartel Pendiente, viña de San Antonio.	106
Fig. 4.30. Calicata blanco C-13 en la viña de San Antonio.	107
Fig. 4.31. Gráficos de caja y probabilidad con parámetros fisicoquímicos de San Antonio.	108
Fig. 4.32. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes en suelo total en San Antonio.	110
Fig. 4.33. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes biodisponibles en San Antonio.	111
Fig. 4.34. Gráficos de caja con contenidos de metales en suelo total en San Antonio.	112
Fig. 4.35. Gráficos de caja con contenidos de metales biodisponibles en San Antonio.	113
Fig. 4.36. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes en los frutos de San Antonio.	114
Fig. 4.37. Gráficos de caja con contenidos de metales en los frutos de San Antonio.	116
Fig. 4.38. Parámetros fisicoquímicos CE, T°, pH y Eh en las aguas de San Antonio.	117
Fig. 4.39. Contenidos de nutrientes en las muestras de aguas de San Antonio.	118
Fig. 4.40. Contenidos de metales en las muestras de aguas de San Antonio.	120
Fig. 4.41. Ubicación de calicatas seleccionadas en la viña de San Antonio.	121
Fig. 4.42. Gráfico de barra con la mineralogía en rocas y suelos de San Antonio.	122
Fig. 4.43. Gráficos de barra con la mineralogía de arcillas en suelos de San Antonio.	123
Fig. 4.44. Contenido de MO, CIC, arcillas y densidad aparente en suelos de San Antonio.	125
Fig. 4.45. Cuartel Isla de la viña de Santa Cruz. Mapa geológico a escala cuartel.	127
Fig. 4.46. Calicatas LI-1 a LI-9 del cuartel Isla en viña de Santa Cruz.	127

Fig. 4.47. Calicata LI-5 y LI-13 del cuartel Isla en viña de Santa Cruz.	128
Fig. 4.48. Cuartel Pendiente de la viña de Santa Cruz. Mapa geológico a escala cuartel.	129
Fig. 4.49. Calicatas LP-10, LP-12 y LP-14. Cuartel Pendiente en viña de Santa Cruz.	129
Fig. 4.50. Gráficos de caja y probabilidad con parámetros fisicoquímicos de Santa Cruz.	131
Fig. 4.51. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes en suelo total en Santa Cruz.	132
Fig. 4.52. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes biodisponibles en Santa Cruz.	133
Fig. 4.53. Gráficos de caja con contenidos de metales en suelo total en Santa Cruz.	135
Fig. 4.54. Gráficos de caja con contenidos de metales biodisponibles en Santa Cruz.	136
Fig. 4.55. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes en los frutos en Santa Cruz.	138
Fig. 4.56. Gráficos de caja con contenidos de metales en los frutos de Santa Cruz.	139
Fig. 4.57. Parámetros fisicoquímicos CE, T°, pH y Eh en las aguas de Santa Cruz.	140
Fig. 4.58. Contenidos de nutrientes en las muestras de aguas de Santa Cruz.	141
Fig. 4.59. Contenidos de metales en las muestras de aguas de Santa Cruz.	143
Fig. 4.60. Ubicación de calicatas seleccionadas en la viña de Santa Cruz.	144
Fig. 4.61. Gráfico de barra con la mineralogía de las rocas granodioríticas de Santa Cruz.	144
Fig. 4.62. Gráfico de barra con la mineralogía de suelos de Santa Cruz.	145
Fig. 4.63. Gráficos de barra con la mineralogía de arcillas en suelos de Santa Cruz.	146
Fig. 4.64. Contenido de MO, CIC, arcillas y densidad aparente en suelos de Santa Cruz.	148
Fig. 4.65. Cuartel Carmenere de la viña de San Javier. Mapa geológico a escala cuartel.	149
Fig. 4.66. Calicatas Mv-4, Mv-5, Mv-7, Mv-8, Mv-10 y Mv-11, en viña de San Javier.	150
Fig. 4.67. Calicatas Ms-1, Ms-2, Ms-3, Ms-6, Ms-9, Ms-12, Ms-13, en viña de San Javier.	151
Fig. 4.68. Gráficos de caja y probabilidad con parámetros fisicoquímicos de San Javier.	153
Fig. 4.69. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes en suelo total en San Javier.	154
Fig. 4.70. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes biodisponibles en San Javier.	155
Fig. 4.71. Gráficos de caja con contenidos de metales en suelo total en San Javier.	157
Fig. 4.72. Gráficos de caja con contenidos de metales biodisponibles en San Javier.	158
Fig. 4.73. Gráficos de caja con contenidos de nutrientes en los frutos en San Javier.	159
Fig. 4.74. Gráficos de caja con contenidos de metales en los frutos de San Javier.	160
Fig. 4.75. Parámetros fisicoquímicos CE, T°, pH y Eh en las aguas de San Javier.	162
Fig. 4.76. Contenidos de nutrientes en las muestras de aguas de San Javier.	163
Fig. 4.77. Contenidos de metales en las muestras de aguas de San Javier.	165
Fig. 4.78. Ubicación de calicatas seleccionadas en la viña de San Javier.	166
Fig. 4.79. Gráfico de barra con la mineralogía de roca y suelos de San Javier.	167
Fig. 4.80. Gráficos de barra con la mineralogía de arcillas en suelos de San Javier.	168
Fig. 4.81. Contenido de MO, CIC, arcillas y densidad aparente en suelos de San Javier.	169
<b>CAPÍTULO 5</b>	
Fig. 5.1. Patrones de tierras raras (REE) para las rocas parentales de las cuatro viñas.	174
Fig. 5.2. Comparación de patrones de REE entre roca y suelos en viña de Casablanca.	176
Fig. 5.3. Patrones de REE en la fase biodisponible de los suelos de Casablanca.	178
Fig. 5.4 Comparación de los patrones de REE en la roca y los suelos de San Antonio.	179
Fig. 5.5 Patrón de REE en la fase biodisponible de los suelos de San Antonio.	181
Fig. 5.6. Comparación de patrones de REE entre roca y suelos en viña de Santa Cruz.	182
Fig. 5.7 Patrón de REE en la fase biodisponible de los suelos de Santa Cruz.	184

Fig. 5.8. Comparación de patrones de REE entre roca y suelos en viña de San Javier.	185
Fig. 5.9 Patrón de REE en la fase biodisponible de los suelos de San Javier.	187
Fig. 5.10. Imágenes BSE con granos de minerales de Casablanca y Santa Cruz.	192
Fig. 5.11. Imagen satelital de viña de San Javier, en que se muestra calicata no cultivada.	195
<b>CAPÍTULO 6</b>	
Fig. 1. Location map of the studied vineyards in Central Chile.	201
Fig. 2. Geochemical patterns and boxplot of essential nutrients (EMN) in the parent rocks and soils.	209
Fig. 3. Boxplots of essential nutrient concentrations in the soil bioavailable phase.	210
Fig. 4. Multielemental graphs of EMN in rainwater, irrigation water and groundwater.	212
Fig. 5. Multielemental patterns of EMN in whole soil, bioavailable phase and bioavailability.	215
Fig. 6. Distribution patterns of EMN in berries.	216
Fig. 7. Ternary graphs of Zn-Cu-Mn and Fe-Mn-Cu composition in berries at the different plots.	220
<b>CAPÍTULO 7</b>	
Fig. 7.1. Gráficos de caja comparativos de metales en química total y de pH en los suelos.	225
Fig. 7.2. Gráficos de caja comparativos de metales en la fase biodisponible en los suelos.	227
Fig. 7.3. Gráficos multielemento con los contenidos de metales en muestras de aguas.	230
Fig. 7.4. Gráficos de caja comparativos de metales en las aguas subterráneas.	231
Fig. 7.5. Patrones con contenidos de metales en las diferentes matrices de Casablanca.	234
Fig. 7.6. Patrones con contenidos de metales en las diferentes matrices de San Antonio.	236
Fig. 7.7. Patrones con contenidos de metales en las diferentes matrices de Santa Cruz.	237
Fig. 7.8. Patrones con contenidos de metales en las diferentes matrices de San Javier.	239
<b>CAPÍTULO 8</b>	
Fig. 8.1. Gráficos de probabilidad de CE, pH y T <sup>o</sup> en las cuatro estaciones de monitoreo.	242
Fig. 8.2. Diagrama Peltier de intensidad de meteorización según condiciones climáticas.	248

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES CIENTÍFICOS

### 1.1.1 EL SUELO COMO SISTEMA DE ESTUDIO

Voroney (2007) propone al suelo como el medio en donde interactúan los sistemas: litósfera, hidrósfera, atmósfera, biósfera y detritósfera (materia orgánica en descomposición). Las interacciones entre estos sistemas ocurren en escalas de tiempo contrastantes, por una parte, los flujos geoquímicos entre litósfera, hidrósfera y atmósfera se producen durante miles a millones de años, mientras que los flujos inducidos biológicamente toman lugar durante un corto periodo de tiempo, desde horas, días a meses.

En la última década, el estudio de las relaciones entre estos sistemas (litósfera, hidrósfera, atmósfera, biósfera) ha cobrado relevancia, lo que se ve reflejado en la creación de numerosos observatorios de la “zona crítica” (Banwart *et al.* 2013). La zona crítica se ha definido como la capa superficial del planeta, que se extiende entre el follaje de los árboles o la vegetación hasta el límite inferior de los acuíferos en la corteza superior (Brantley *et al.* 2006). En esta zona ocurren intercambios de masa y energía entre la litósfera, atmósfera, biosfera e hidrósfera. Tales intercambios, pueden estudiarse o explorarse en registros obtenidos desde la atmósfera, océanos, ríos, suelos y sedimentos (Brantley *et al.* 2007).

En cuanto al estudio de suelos, Jenny (1941) estableció que la formación de los suelos está dada por cinco factores independientes: clima, material parental, topografía, organismos y tiempo. El grado de interacción o las propiedades particulares de cada factor, imprimirán condiciones específicas al suelo formado en un área dada. No obstante, el mismo autor, Jenny (1980) y, más tarde, Amundson & Jenny (1991; 1997) proponen que la actividad humana debe integrarse como un sexto factor en el estudio del sistema suelo, en cuanto el ser humano ha sido reconocido como un agente modificador de las condiciones naturales.

El suelo por lo tanto, no es sólo parte de la naturaleza como sustento de la vida terrestre (Voroney 2007), si no que ha sido usado por la humanidad como un recurso para llevar a cabo actividades productivas, extractivas y acumulativas, las cuales generan cambios en las propiedades originales del suelo. Estos cambios ya han sido considerados en el sistema de clasificación de suelos (FAO 2007), denominando a suelos altamente intervenidos o a aquellos formados por la acumulación de desechos humanos como Antrosoles y Tecnosoles.

Particularmente, se ha observado que la intensificación de las prácticas agrícolas y la presión sobre los agro-ecosistemas han modificado fuertemente las propiedades del suelo así como la evolución de los procesos pedogenéticos (Matson *et al.* 1997, Bajard *et al.* 2016).

### **1.1.2 METEORIZACIÓN DE ROCAS Y GÉNESIS DEL SUELO**

En términos geoquímicos y biogeoquímicos, la génesis de los suelos ocurre en una primera etapa por la meteorización física y química de las rocas y minerales que han sido expuestos a la acción del clima. En condiciones exógenas, la mayoría de los minerales primarios de las rocas son termodinámicamente inestables y, por lo tanto, susceptibles a experimentar cambios físicos y químicos (White 2003). De manera concomitante a la meteorización química y física, los organismos colonizadores, que corresponden a aquellos capaces de realizar fotosíntesis y fijar nitrógeno desde la atmósfera, promueven los procesos de meteorización biogeoquímica del material parental, a través de su actividad biológica, generando la liberación de nutrientes que quedan disponibles para las plantas e iniciando el proceso de formación de suelo (Voroney 2007).

En relación a lo anterior, se ha comprobado que las plantas vasculares (aquellas con raíces, tallo y hojas) y su microbiota asociada (bacterias y hongos) aceleran la meteorización mineral por la interacción raíz-sustrato y por la habilidad de los microorganismos del suelo (Stevenson & Cole 1999; Plante 2007) y de las plantas (Morgan & Connolly 2013) de cambiar el pH y el potencial de óxido-reducción (Eh) del sistema, con el objeto de solubilizar minerales para captar nutrientes.

### **1.1.3 ELEMENTOS ESENCIALES PARA EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS**

Los nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas son al menos dieciséis elementos químicos, los cuales se dividen en macro y micronutrientes en base a la cantidad en que estos son requeridos. Los macronutrientes corresponden a C, H, O, N, P, K, Ca, Mg y S (ej. Rogiers *et al.* 2006) y forman parte de los constituyentes orgánicos estructurales de las plantas, mientras que Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo y Cl, son considerados micronutrientes y su función se relaciona principalmente a la actividad enzimática y a la osmoregulación (ej. Marschner 1995). Otros elementos tales como Na, Si, Co, V e I, han sido considerados como beneficiosos para el crecimiento de las plantas, aunque no esenciales (Broadley *et al.* 2012; Marschner 1995). En ambientes sin intervención antrópica, las plantas obtienen C, H y O desde el aire y el agua, mientras que el N es derivado principalmente desde la atmósfera por medio de la actividad biológica (ej. Plante 2007). El resto de macro, micronutrientes y elementos beneficiosos provienen mayoritariamente desde la litósfera (ej. Berner *et al.* 2003; Plante 2007). Arnon &

Stout (1939), denominaron como elemento o nutriente mineral esencial, en inglés *essential mineral nutrient* (EMN) a aquellos elementos químicos que: (a) la planta requiere para completar su ciclo de vida, (b) están directamente relacionados en sus procesos metabólicos y (c) son elementos que no pueden ser reemplazados por otro; es decir, elementos que tienen una función específica en la planta (Marschner 1995). Los EMN usan la denominación “mineral” ya que los elementos químicos son captados por las plantas en estado iónico o “inorgánico” y hace referencia al proceso “mineralización” que es la conversión de un elemento en estado orgánico a un estado inorgánico mediado por la actividad microbiológica (ej. Stevenson & Cole 1999; Plante 2007).

Por esta misma vía, otros elementos químicos presentes en la litósfera como aquellos del grupo de las tierras raras (Tyler 2004; Bertoldi *et al.* 2009; Kabata-Pendias 2011; Zaharescu *et al.* 2017) así como también metales y metaloides, tales como mercurio, arsénico, plomo, cadmio, entre otros; si bien no son esenciales para los organismos, pueden ingresar en la estructura de las plantas, siendo éstos potencialmente tóxicos (Stevenson & Cole 1999; Havlin 2005; Plante 2007; Kabata-Pendias 2011 y sus referencias).

#### **1.1.4 BIODISPONIBILIDAD DE ELEMENTOS EN EL SUELO**

Como ya fue mencionado, la liberación de los EMN desde la litósfera comienza a través de la acción del proceso de meteorización de las rocas, en el que interactúan factores físicos, químicos y biológicos (Brantley *et al.* 2006), que se resume en una transformación de los minerales primarios o formadores de la roca o del material parental (Berner *et al.* 2003, Plante 2007) en minerales secundarios (arcillas, óxidos e hidróxidos, carbonatos y sales) y la liberación de iones. De manera concomitante, los procesos pedogenéticos y la colonización biológica, generan acumulación y descomposición de materia orgánica y generación de compuestos órgano-minerales (proceso también llamado “inmovilización” biológica de nutrientes). De este modo, la interacción e intensidad de estos procesos, controlan en gran medida, la movilidad y biodisponibilidad de los elementos en el suelo.

Por otra parte, aun cuando los elementos mayores y traza, correspondientes a nutrientes o a elementos no esenciales, tienen como fuente principal las rocas o materiales parentales, éstos pueden ingresar al suelo como impurezas o contaminantes en enmiendas del suelo (fertilizantes, pesticidas, abonos, etc.), así como también en partículas transportadas por el aire y por el agua de lluvia (Stevenson & Cole 1999) e incluso, aunque sin correlación directa (Surdyka *et al.* 2010; Funes *et al.* 2017), con el agua de riego.

Otro factor a considerar es que los elementos trazas en el suelo ocurren en distintas formas o reservorios, pudiéndose encontrar también en diferentes especies químicas, lo que influirá en su disponibilidad para las plantas y en su potencial toxicidad. Las formas en que los micronutrientes y metales pueden encontrarse en el suelo (Stevenson & Cole 1999; Kabata-Pendias 2011) son las siguientes: a) Solubles en agua, ya sea como cationes libres o formando complejos con ligandos orgánicos e inorgánicos. b) En posiciones intercambiables de algunas arcillas. c) Específicamente adsorbidas a algunas fases minerales según condiciones particulares. d) Adsorbida o formando complejos con materia orgánica, incluyendo residuos de plantas, humus y organismos vivos (biomasa del suelo). e) Como minerales “insolubles”, incluyendo aquellos ocluidos dentro de óxidos (nódulos) de Fe-Mn; y f) Como minerales escasamente solubles o como cationes que han experimentado sustitución isomorfa en las posiciones octaédricas de algunas arcillas.

A groso modo, es posible delimitar tres fases principales, una fase adsorbida, soluble o biodisponible, una fase enlazada o insoluble, y por último, una fase conservada en complejos órgano-metálicos estables (Fig. 1.1). En términos de biodisponibilidad (de nutrientes o metales) a las plantas, estas tres fases varían en la escala de tiempo en la cual interactúan en el sistema material parental-suelo-planta, lo cual no implica que las interacciones no estén ocurriendo. Esto quiere decir, que una parte de los cationes que serán absorbidos por la planta son generados en tiempo real por la meteorización química (Castillo *et al.* 2015a), a través de reacciones como hidratación, intercambio iónico, lixiviación e hidrólisis de silicatos (White, 2005). En suelos maduros, la tasa de descomposición de la materia orgánica y la liberación de nutrientes mediada por microorganismos, es la principal responsable del estado nutricional del suelo, sin embargo, el proceso de meteorización química, principalmente en suelos con mayor contenido de minerales, como es el caso de los suelos mediterráneos (Yaloon 1997; Torrent 2005), es un motor que ha liberado nutrientes en una larga escala de tiempo (Brantley *et al.* 2007) desde que la roca ha sido expuesta a las condiciones supérgenas hasta que existan minerales susceptibles a meteorizarse, según las condiciones termodinámicas de los suelos, las que ciertamente pueden ser modificadas por el manejo agrícola.

#### **1.1.5. RELACIÓN BIOGEOQUÍMICA SUELO-PLANTA**

Si bien, la mayoría de estos EMN son muy abundantes dentro de la corteza terrestre factores fisicoquímicos, biológicos y geoquímicos pueden afectar la disponibilidad de adquisición de estos nutrientes; por esto las plantas han generado estrategias para la captura de nutrientes en la rizósfera (Morgan & Connolly 2013), específicamente la vid es capaz de reaccionar a nivel fisiológico, bioquímico, e incluso, genético para enfrentar un estrés como la sequía (Serra *et al.*

2014) o el déficit nutricional (Tagliavini and Rombolà, 2001). En la rizósfera se genera un gradiente de absorción y liberación de nutrientes entre el sistema radical y el sustrato (Darrah 1993), en la función de la planta de generar un suministro adecuado de nutrientes para satisfacer las demandas de sus procesos celulares básicos (Morgan & Connolly 2013).

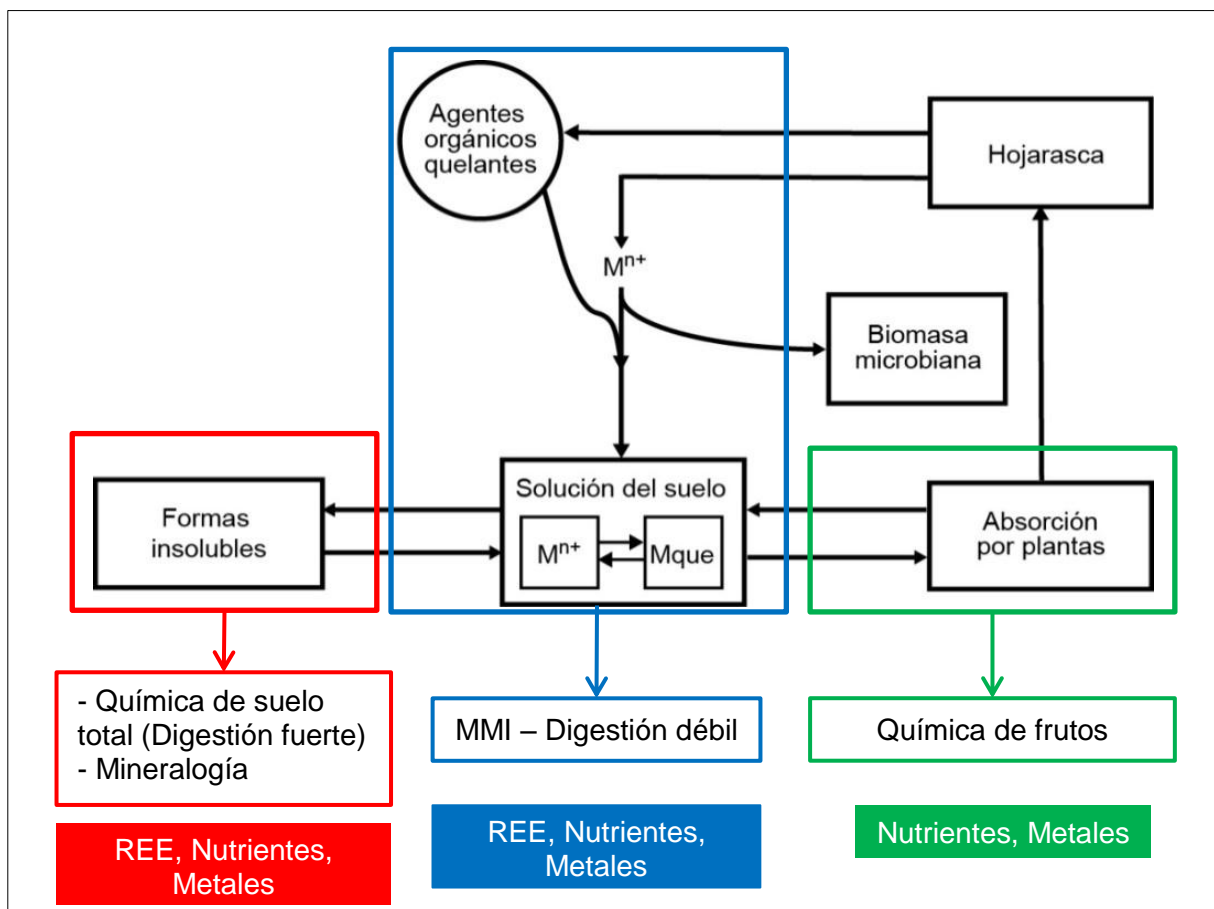


Figura 1.1. Estado de estabilidad de las fases en los suelos. Modificado de Stevenson & Cole (1999).

Al interior de la planta los elementos son transportados a través de dos sistemas vasculares, denominados floema y xilema, hacia los diferentes tejidos (Rogiers *et al.* 2001). De acuerdo a su patrón de acumulación en uvas del cultivar\* (cv.) Shiraz (\*Glosario), los nutrientes fueron divididos por Rogiers *et al.* (2006), como móviles a través del floema (K, P, S, Mg, B, Fe y Cu) con un patrón de acumulación en la baya que ocurre durante todo el crecimiento y hasta la maduración y por otra parte, los elementos móviles a través del xilema (Ca, Mn y Zn), que se acumulan mayoritariamente sólo hasta “la pinta” (estado fenológico de la baya en que sufre cambios en sus paredes celulares que acompañan el ablandamiento y marca el inicio de la generación de antocianos, los que le dan color a la baya, en el caso de los cultivares tintos). Otros estudios realizados en uvas de cv. Chardonnay (Bertoldi *et al.* 2011), muestran similares resultados excepto para Mg, que tiene en este cultivar un comportamiento opuesto al



presentado por Rogiers *et al.* (2006). Por este motivo, factores como el cultivar\*, la edad de la planta y el manejo agrícola influirán en el contenido de los elementos en la uva. Otros factores según Jackson (2014), corresponden a características del portainjerto\* (\*Glosario), influencias climáticas en la tasa de transpiración y propiedades distintivas en el contenido mineral del suelo.

## 1.2 MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo doctoral forma parte del Proyecto CORFO 12CTI-16788 denominado “Influencias geológicas, mineralógicas y geoquímicas del cultivo de la vid en Chile”, el cual se desarrolló en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile y fue financiado por CORFO y el Consorcio I+D Vinos de Chile. Este proyecto tiene como finalidad estudiar el rol de la geología en la viticultura bajo diferentes escalas de trabajo y desde variadas aproximaciones: geomorfológicas, hidrogeológicas, petrográficas, mineralógicas y geoquímicas.

Particularmente esta investigación busca comprender e identificar la influencia del material o roca parental en las propiedades geoquímicas, mineralógicas y en la biodisponibilidad de elementos en suelos vitivinícolas y, asimismo, identificar la influencia de la actividad agrícola y del medioambiente del entorno del viñedo, en la geoquímica del suelo, para finalmente trazar esta geoquímica del suelo con la química de los frutos de la planta *Vitis vinífera L.*

Los principios básicos que guían esta investigación son:

- La naturaleza como un sistema integrado con interacciones y continuos cambios
- El ser humano como un sistema modificador de la naturaleza

## 1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO

### 1.3.1 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS

En suelos naturales, es decir aquellos con vegetación autóctona, relativamente no intervenidos, la mineralogía y la geoquímica de los componentes minerales que conforman el suelo (45% del volumen total) poseen un equilibrio dinámico con las condiciones climáticas, topográficas, hidroquímicas y biológicas del entorno, mediante los procesos de interacción agua-atmósfera-roca-organismos.

La agricultura genera una intervención de los suelos naturales, la que se relaciona a la tala total o parcial de la vegetación nativa, la fertilización con abonos orgánicos y/o agroquímicos, la irrigación artificial, el uso de pesticidas y el laboreo del suelo, provocando alteraciones a las

condiciones naturales en que el suelo ha sido formado y a las condiciones de equilibrio dinámico del sistema no intervenido.

### **1.3.2 HIPÓTESIS**

Tal como se reconocen modificaciones biológicas y bioquímicas con el cambio de uso del suelo, se plantea como hipótesis que un nuevo equilibrio dinámico en las propiedades geoquímicas y mineralógicas del perfil de suelo pueden producirse en respuesta a la intervención agrícola. Además las características geológicas del material parental del suelo, así como también la química del medioambiente de las áreas de estudio, no solo influyen en el crecimiento y calidad de la fruta, sino que además generarán improntas químicas en el fruto, las cuales podrían ser evaluadas mediante trazadores geoquímicos.

### **1.3.3 PREGUNTAS CIENTÍFICAS**

En base a esta hipótesis, las preguntas científicas que guiarán esta investigación son: a) ¿Cuál es la influencia relativa del material parental y de la actividad antrópica en las condiciones actuales de equilibrio del “sistema suelo” en estudio? b) ¿Qué procesos geoquímicos o pedogenéticos están ocurriendo en los suelos? y c) ¿Es trazable la química de la roca, suelos y aguas en la química de la planta?

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio geoquímico y medioambiental integrado de la zona crítica, mediante dos años de mediciones en cuatro viñedos de Chile Central (33,15°-35,45°S), para determinar la influencia del material parental y de la actividad antrópica en las propiedades del suelo y en las características químicas del fruto.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a. Generar una metodología de medición y monitoreo de las matrices: roca, suelo, frutos y aguas, en sistemas de cultivo de vid para producción de vino.
- b. Caracterizar la geología y geomorfología de las cuatro microcuencas en que se ubican las viñas en estudio.
- c. Realizar un levantamiento geo-pedológico mediante calicatas en cuarteles\* seleccionados.

- d. Monitorear, muestrear y analizar las matrices roca, suelo, frutos y aguas, en cuatro temporadas de medición y dos años de muestreo.
- e. Determinar la herencia geoquímica del material parental en el suelo desarrollado a partir de él mediante análisis geoquímicos y mineralógicos.
- f. Determinar el efecto que tiene el manejo agrícola y las condiciones medioambiente en los en las propiedades del suelo y frutos.
- g. Evaluar si la química de las bayas tiene una relación directa con aspectos geoquímicos del suelo.

## 1.5 ENFOQUE METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

En relación a los antecedentes anteriormente expuestos, el planteamiento de esta investigación se concentra en la fracción mineral o inorgánica del suelo. Considerando además la fisicoquímica del suelo, la hidroquímica (agua de lluvia, agua de riego y agua subterránea) y las condiciones medioambientales (naturales y antrópicas) de las microcuencas en estudio, debido a que estos parámetros pueden estar determinando la disponibilidad de elementos y la precipitación o disolución de fases mineralógicas en el suelo.

Los resultados esperados, apuntan a reconocer la geoquímica de los siguientes grupos de elementos: a) Elementos de las tierras raras (REE): La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu, medidas en roca, suelo y agua; b) Nutrientes: P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Na, Al y Rb en las matrices roca, suelo, agua y bayas; y c) Metales: Cd, Pb, Hg, As, Sb, Cr, Ni, Sn, Zn, Cu, Mo, Au y Ag, registrados en las matrices roca, suelo, agua y bayas.

En el suelo, la geoquímica de estos grupos de elementos será analizada desde dos fases: a) la fase biodisponible, que corresponde a las fases solubles, adsorbidas e intercambiables presentes en el suelo, y en la química total del suelo, que incluye todas las fases mineralógicas presentes.

## 1.6 UBICACIÓN Y ACCESOS DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO

Las viñas en estudio se ubican en la Zona Central de Chile, específicamente entre los 33°15' a 35°45', en el contexto de las unidades morfológicas de la Cordillera de la Costa y de la Depresión Intermedia.

Las viñas de Casablanca y de San Antonio se ubican en la V Región de Valparaíso, en las provincias de Valparaíso y de San Antonio, respectivamente. Por su parte la viña de Santa Cruz

se localiza en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, en la Provincia de Colchagua y la viña de San Javier se sitúa en la VII Región del Maule, específicamente en la Provincia de Linares (Fig. 1.2).

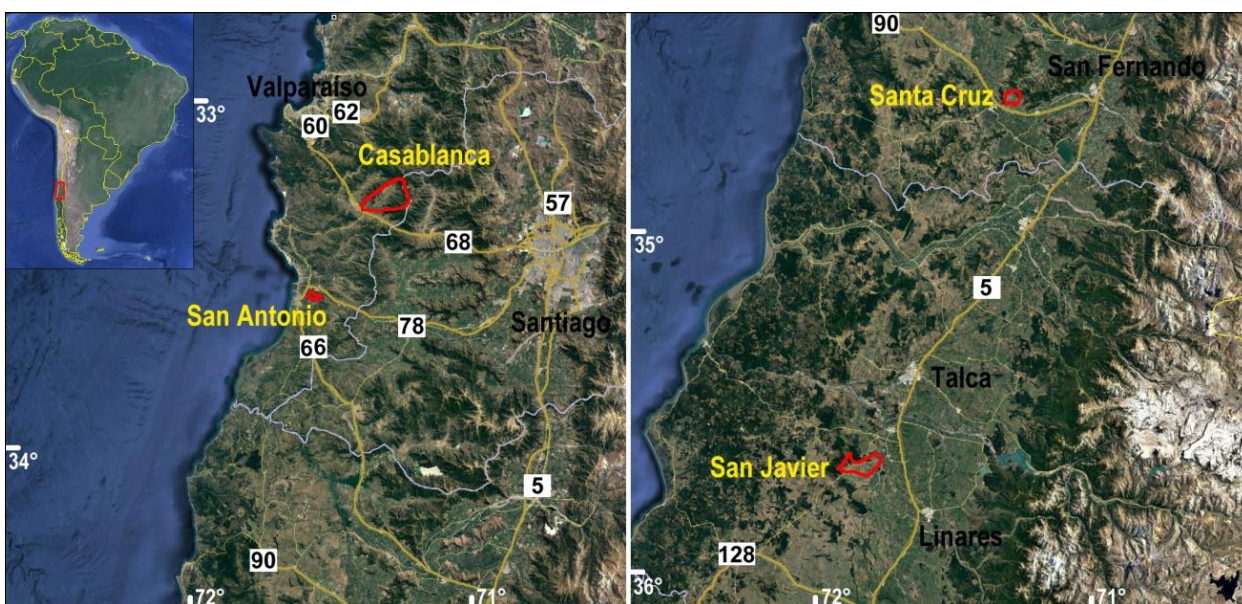


Figura 1.2. Ubicación y accesos de las cuatro áreas de estudio. Imagen obtenida de Google Earth.

La viña de Casablanca se ubica 68 km al oeste de Santiago y a 40 km al este de Valparaíso. Para acceder a la viña desde la ciudad de Santiago, se toma la Ruta 68 con dirección a Valparaíso y luego el enlace a Casablanca (Fig. 1.2). En terreno se utilizan los caminos asfaltados F-864-G y F870, entre otros caminos públicos y privados.

La viña de San Antonio está localizada a 32 km al oeste de Santiago y a 6 km al este de la ciudad de San Antonio. El acceso a esta viña, desde la ciudad de Santiago, se realiza directamente por la Ruta 78 (Autopista del Sol) y luego se enlaza a la localidad de Malvilla, por la Ruta G-974. Al interior de la zona de Malvilla se utilizan además diferentes caminos asfaltados y de tierra de carácter público y privados.

El área de estudio de Santa Cruz se ubica 140 km al sur-oeste de la ciudad de Santiago y 30 km al oeste de la ciudad de San Fernando. Para acceder hasta allí se utiliza la Ruta 5-Sur desde la ciudad de Santiago y a la altura de San Fernando se toma la Ruta 90 con dirección a la costa, finalmente para acceder a la viña, antes de llegar a la ciudad de Santa Cruz, se enlaza con la Ruta I-350. Al igual que las otras áreas de trabajo, en este sector se utilizan diversos caminos públicos y privados.

Por último, la viña de San Javier se ubica a 270 km al sur-oeste de la ciudad de Santiago y a 35 km al sur-oeste de la ciudad de Talca. Para acceder a esta viña desde Santiago, se utiliza la

Ruta 5 Sur, desde esta ruta se ingresa por las rutas L-30-M, Ruta de los Conquistadores y L-32, o bien, desde la ciudad de Linares se utiliza la ruta L-32 hasta la localidad de Melozal. En el área de estudio se utilizan diversos caminos, principalmente de tierra, de uso público y privado.

## 1.7 TRABAJOS ASOCIADOS A LA INVESTIGACIÓN

En este proyecto de investigación se ha llevado a cabo el desarrollo de tres memorias de grado y una tesis de magister, cuyos resultados serán utilizados como información básica y, a la vez, serán analizados y discutidos en esta tesis de doctorado.

Lagos (2015), estudia las características geomorfológicas distintivas de las áreas de Casablanca y San Antonio, definiendo a estas zonas como relieves de acumulación y de erosión, respectivamente. Por otra parte, presenta aspectos granulométricos y texturales de las diferentes unidades geológicas recientes que se reconocieron en estas áreas de trabajo.

Contreras (2017), presenta la geología local y aspectos geomorfológicos básicos de las cuatro viñas en estudio, prestando atención en las características petrográficas de las rocas parentales y unidades litológicas presentes en las cuatro cuencas, con el fin de correlacionarlas con aspectos texturales de suelos desarrollados directamente sobre la roca.

López (2018), estudia la hidrogeología de las cuatro microcuencas en estudio con énfasis en la geometría y propiedades de los acuíferos y de las unidades hidrogeológicas, la dirección del flujo de las aguas subterráneas y las variaciones estacionales del nivel freático. A la vez, analiza la hidrogeoquímica e hidroquímica de las aguas subterráneas, aguas de riego y aguas de lluvia, generando un modelo hidrogeoquímico de las cuatro áreas.

Por su parte, Salgado (2019) realiza análisis mineralógicos de difracción de rayos X a muestras seleccionadas de las viñas de San Antonio y Santa Cruz, con el objetivo de determinar los filosilicatos presentes en la fracción tamaño arcilla de las muestras de suelo, para discutir los procesos de formación de estos minerales en el suelo y determinar la relación entre la mineralogía de las rocas parentales y la mineralogía de los suelos en cuestión.

Estos trabajos, en conjunto con avances de esta tesis de doctorado, han sido también presentados en diversos congresos científicos nacionales e internacionales, resultando en las siguientes publicaciones:

1. **CASTILLO, P.**, TOWNLEY, B., SERRA, I. 2018. *Flujo de elementos químicos desde la roca a la uva*. XV Congreso Geológico Chileno. Concepción-Chile.

2. **CASTILLO, P.**, LÓPEZ, S., TOWNLEY, B., SERRA, I. 2018. *Influencia antrópica en la bio-geoquímica del sistema roca-suelo-planta, estimada por metales, metaloides y tierras raras en suelos vitivinícolas de la Zona Central de Chile*. XV Congreso Geológico Chileno. Concepción-Chile.
3. LÓPEZ, S., **CASTILLO, P.**, SERRA, I., TOWNLEY, B., FLORES, P. 2018. *The role of hydrogeology in the development of viticulture*. XV Congreso Geológico Chileno. Concepción-Chile (Trabajo premiado en el Congreso).
4. LÓPEZ, S., **CASTILLO, P.**, RUTTGER, D., TOWNLEY, B. 2018. *Procesos hidrogeoquímicos y contaminación de aguas subterráneas en cuatro viñas de la Zona Central de Chile*. XV Congreso Geológico Chileno. Concepción-Chile.
5. OLIVARES, M.F., ACEVEDO, L., **CASTILLO, P.**, TOWNLEY, B., FLORES, P. 2018. *Caracterización geo-vitivinícola en Chile desde la Región de Atacama a la Región de Aysén*. XV Congreso Geológico Chileno. Concepción-Chile.
6. PLAZA, S., TOWNLEY, B., **CASTILLO, P.** 2018. *Geochemistry of substrate/soil interface in vineyards: Applications to mineral characterization and land evaluation*. XV Congreso Geológico Chileno. Concepción-Chile.
7. **CASTILLO, P.**, TOWNLEY, B., ABURTO, F. 2017. *REE distribution in cultivated and no cultivated soils in two viticultural areas of Central Chile: Mineralogical, Pedological and Anthropic influences*. AGU Fall Meeting. New Orleans-USA.
8. **CASTILLO, P.**, SERRA, I., TOWNLEY, B., LÓPEZ, S., FLORES, P. 2017. *Biogeochemical association of soil and nutrients in cv. Carmenere and Pinot Noir berries: Applied study in four vineyards of Central Chile*. 40th Congress of Vine and Wine. Sofía-Bulgaria.
9. LÓPEZ, S., **CASTILLO, P.**, SERRA, I., TOWNLEY, B. FLORES, P. 2017. *Geological and hydrogeological influences in the development of roots in viticulture, study in four vineyards of the Central Zone of Chile*. 40th Congress of Vine and Wine. Sofía-Bulgaria.
10. LÓPEZ, S., **CASTILLO, P.**, TOWNLEY, B. 2017. *Hydrogeochemical process and contamination of groundwater in Tapihue alluvial basin, Central Chile*. Goldschmidt Conference. Parias-Francia.
11. **CASTILLO, P.**, TOWNLEY, B., SERRA, I., CONTRERAS, M. 2016. *Geoquímica y variaciones fisicoquímicas estacionales en suelos vitivinícolas de la Zona Central de Chile*. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto-Argentina.
12. **CASTILLO-LAGOS, P.**, TOWNLEY, B., CONTRERAS, M., SERRA, I., FLORES, P., TURNER, N., MANN, A. 2016. *Rare earth elements (REE) geochemistry as tracers of pedogenetic processes and parent materials in viticultural soils from Central Chile*. 1er



- Encuentro de jóvenes investigadores en Ciencias del Suelo. Valdivia-Chile (Trabajo premiado en el Congreso).
13. SALGADO, P., **CASTILLO-LAGOS, P.**, KELM U., URIBE, M. 2016. *Methodologies for organic matter extraction in vineyards soil samples and implications in x-ray diffraction analysis of clay minerals*. 1er Encuentro de jóvenes investigadores en Ciencias del Suelo. Valdivia-Chile (Trabajo premiado en el Congreso).
  14. **CASTILLO, P.**, TOWNLEY, B., CONTRERAS, M., LÓPEZ, S., CORTÉS, E. 2015. *Análisis geoquímico de suelos derivados de granitoides en los valles de Casablanca y Santa Cruz*. XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena-Chile.
  15. CONTRERAS, M., **CASTILLO P.**, LAGOS, F., FARÍAS, M., TOWNLEY, B. 2015. *Geología y Petrografía de dos viñas en los valles vitícolas de Casablanca y Santa Cruz, Chile Central*. XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena-Chile.
  16. TOWNLEY, B., **CASTILLO P.** 2015. *Geología, Geoquímica y Vinos*. XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena-Chile.

Además las publicaciones científicas preparadas y en preparación, adscritas al sistema WOS (ex ISI), asociadas a esta tesis de doctorado son, al momento, las siguientes:

1. **CASTILLO P.**, SERRA I., TOWNLEY, B., LÓPEZ, S., CONTRERAS M., FLORES P. (submitted). Biogeochemistry of plant essential nutrients between rock, soil, water and fruits in vineyards of Central Chile: Lithologic and Anthropic sources. (Catena)
2. **CASTILLO P.**, TOWNLEY, B., SERRA, I., SALGADO, P., LÓPEZ, S., CONTRERAS, M., MANN, A. (en preparación). Rare earth elements geochemistry and mineralogical transformations from granitic parent materials to soils in two vineyard environments of Central Chile: Lithogenic, Pedogenetic and Antropogenic Influences. (Geoderma).
3. TOWNLEY, B., **CASTILLO, P.**, BROSSARD, N., LÓPEZ, S., SERRA, I. (en preparación). *Geology, Geochemistry and Wines: Guides to Geo Viticulture*. (Andean Geology)

Adicionalmente se realizaron los siguientes informes internos para el Consorcio I+D Vinos de Chile y CORFO:

1. OLIVARES, F., ACEVEDO, L., **CASTILLO, P.**, TOWNLEY, B. 2018. Mapa Geovitivinícola de Chile, escala 1:1.000.000. Shapefiles para Plataforma Digital VitisGeoClima, Manual Técnico y Manual de usuario. Informe Interno Proyecto Corfo – Consorcio I+D Vinos de Chile.

2. **CASTILLO, P.**, LÓPEZ, S., SALGADO, P., CONTRERAS, M., TOWNLEY, B., SERRA, I. 2017d. Informe N°2: Resultados estudio piloto años 2014-2017 del Proyecto “Influencias geológicas, mineralógicas y geoquímicas del cultivo de la vid en Chile”. Informe Interno Proyecto Corfo – Consorcio I+D Vinos de Chile. 46 pp.
3. **CASTILLO, P.**, TOWNLEY, B., LÓPEZ, S., SALGADO, P. 2017c. Manual Metodológico para el estudio geológico-ambiental de viñedos (Versión 2). Informe Interno Proyecto CORFO – Consorcio I+D Vinos de Chile. Santiago. 19 pp.
4. **CASTILLO, P.**, TOWNLEY, B., LÓPEZ, S. 2016. Manual Metodológico para el estudio geológico-ambiental de viñedos (Versión 1). Informe Interno Proyecto CORFO – Consorcio I+D Vinos de Chile. Santiago. 11 pp.
5. **CASTILLO, P.**, CONTRERAS, M., LÓPEZ, S., SERRA I., TOWNLEY, B. 2015. Informe resultados año 2: Proyecto Influencias geológicas, mineralógicas y geoquímicas del cultivo de la vid en Chile. Informe Interno Proyecto Corfo – Consorcio I+D Vinos de Chile. 175 pp.
6. CONTRERAS, M., **CASTILLO, P.**, LAGOS, F. 2014. Mapas geológicos y geomorfológicos: Descripción de unidades petrográficas de las viñas de Casablanca, San Antonio, Santa Cruz y San Javier. Informe Interno Proyecto CORFO – Consorcio I+D Vinos de Chile. Santiago. 24 pp.





Para describir la metodología llevada a cabo en esta investigación se utilizará en primera instancia un enfoque general del desarrollo temporal y secuencial de las actividades realizadas en los viñedos en estudio. Posteriormente para detallar el trabajo realizado en terreno y en gabinete. El diseño de muestreo y monitoreo en los viñedos, se presenta según las escalas de trabajo consideradas (a nivel de microcuenca, local y puntual). Las metodologías analíticas y de preparación de muestras serán descritas según las matrices analizadas (roca, suelo, agua y frutos).

Por último, cabe destacar, que en el marco del Proyecto CORFO-Vinos de Chile, se realizó un Manual Metodológico, en el cual esta metodología ha sido validada y analizada con el objetivo de ser aplicada en adelante como una estandarización básica para el estudio geológico-ambiental de viñedos en nuestro país (Castillo *et al.* 2017a).

## 2.2 DISEÑO TEMPORAL DE LA INVESTIGACIÓN

Las actividades realizadas en cada una de las viñas se desarrollan durante cinco temporadas de trabajo en terreno (Fig. 2.2). En la primera temporada se llevó a cabo un levantamiento geológico y geomorfológico, escala 1:20.000, de la microcuenca en la que se emplaza cada viñedo seleccionado. En las posteriores cuatro temporadas de trabajo se testeó una metodología que incluye un levantamiento geológico-pedogenético, escala 1:5.000, de uno a dos cuarteles seleccionados dentro de los viñedos y, además, en las cuatro temporadas (Invierno 2014, Verano 2015, Invierno 2015 y Verano 2016) se realizó la medición, muestreo y análisis de las matrices suelo, agua, frutos y hojas.

El segundo año de medición (temporadas Invierno 2015 y Verano 2016) considera la selección de doce nuevas plantas para la realización de calicatas. Las nuevas plantas elegidas (según los mismos parámetros del primer año) se ubican en un sector inmediatamente aledaño a las calicatas realizadas en el año anterior (Fig. 2.3B). Nuevamente se miden los parámetros fisicoquímicos en ambas temporadas y se realiza el muestreo de suelos para análisis de elementos biodisponibles en el verano de 2016. Además durante esta última campaña se realiza en cada viña una a dos “calicatas blanco”, ubicadas en sectores en que el suelo se encuentre sin intervención agrícola, idealmente donde se reconoce vegetación autóctona.

Finalmente, en el segundo año se realiza, en ambas temporadas (Invierno 2015 y Verano 2016), la medición de los niveles freáticos y el muestreo de agua subterránea; por su parte, el agua de lluvia y el agua de riego se miden y muestrean en las temporadas de invierno y de verano, respectivamente. Además, previo a la cosecha, se realiza el muestreo de frutos en verano.

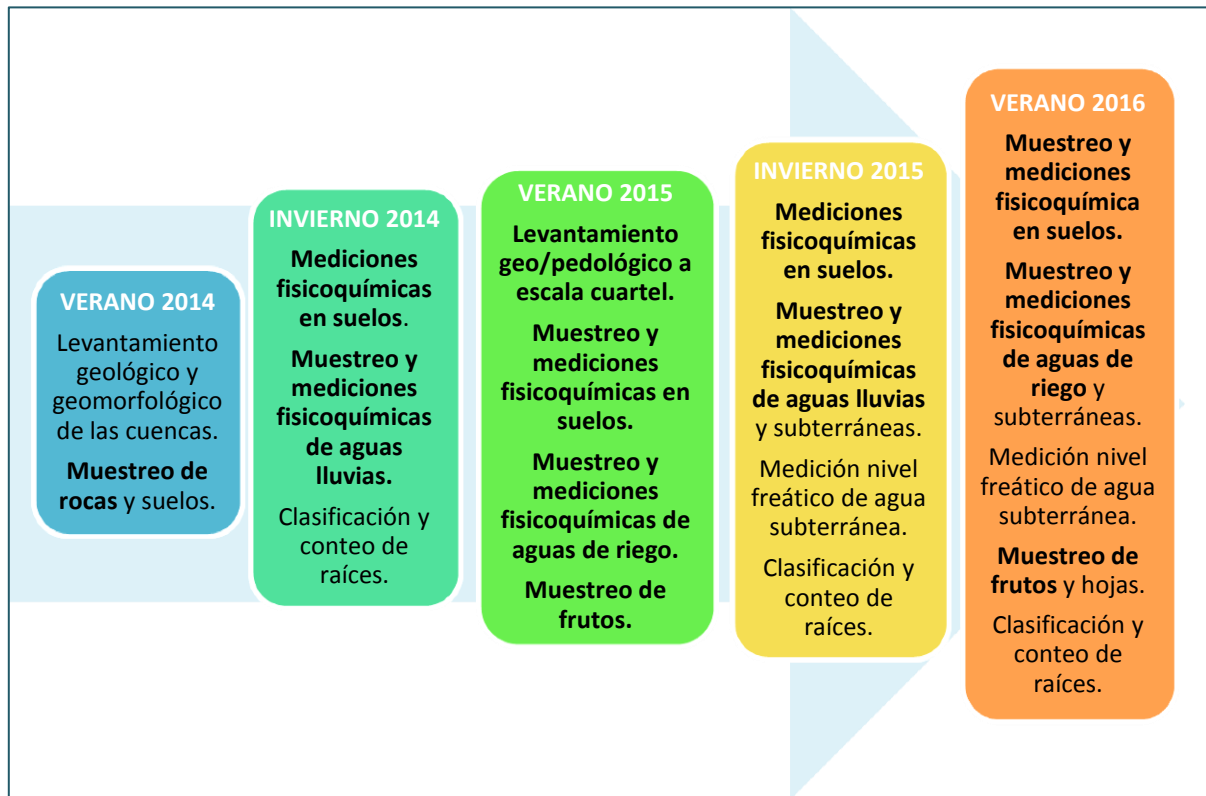


Figura 2.2. Diseño experimental del trabajo progresivo en cuatro viñas piloto. En negrita se destacan actividades que tienen directa relación con esta investigación.

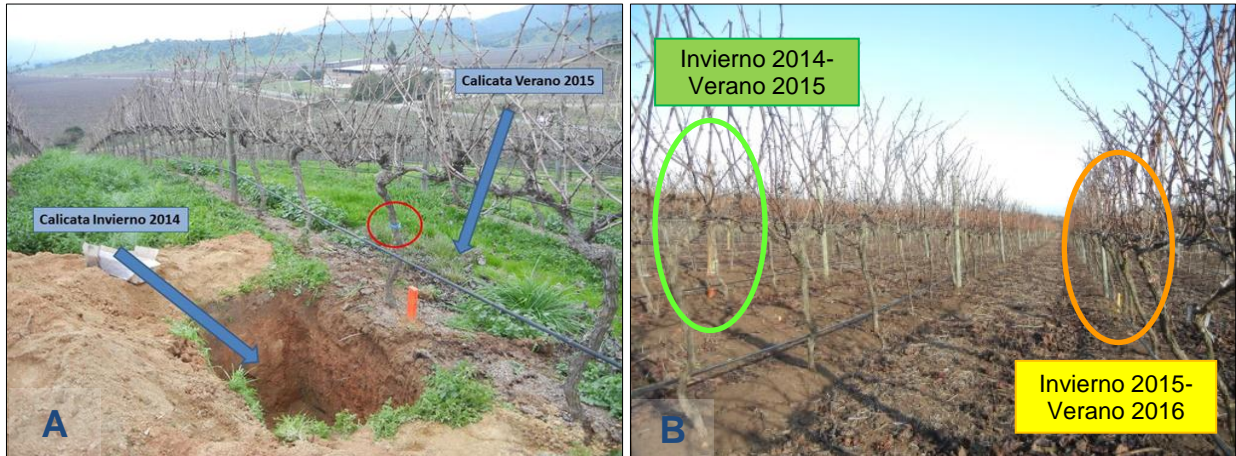


Figura 2.3. (A) Modalidad de realización de calicatas en temporadas invierno y verano tomando en consideración la planta seleccionada en círculo rojo. (B) Ubicación cercana de plantas seleccionadas para realización de calicatas en primer y segundo año de medición. Estaca naranja marca calicatas Invierno 2014-Verano 2015, estaca amarilla marca calicatas Invierno 2015-Verano 2016.

### 2.3 METODOLOGÍA DE ESTUDIO A NIVEL DE MICROCUENCA

Previo a la descripción de las metodologías de trabajo, se presentan a continuación los criterios para la selección de los viñedos. Posteriormente se detalla la metodología de trabajo aplicada para el estudio de la microcuenca en la que se emplazan los viñedos seleccionados.

### 2.3.1 SELECCIÓN DE VIÑEDOS

Para la selección de los cuatro viñedos pilotos se consideraron características como ubicación del viñedo, la geología de la microcuenca en la que se emplaza la viña y otros parámetros específicos de las plantas y de los métodos agrícolas, los que se detallan a continuación:

- a. Las cuatro viñas debían estar en cuatro valles vitícolas diferentes y en contextos geomorfológicos y geológicos distintos.
- b. Se seleccionarían dos cultivares (cepas) para el estudio: en dos de las viñas piloto se seleccionarían uno a dos cuarteles\* (\*Glosario) plantados con un cultivar\* para producción de vino tinto y en las otras dos viñas se elegirían uno a dos cuarteles plantados con un cultivar para la elaboración de vino espumante.
- c. Los pares de viñas del mismo cultivar\* (cv.) debían contener plantas adultas y con edades similares. Las parras deben estar plantadas “a pie franco\*”, es decir, sin uso de portainjertos\*, lo que implica que tanto la parte sobre el suelo (dosel\*) como la subterránea (sistema de raíces) pertenecen a una misma planta. Esto se diferencia de una planta injertada, en que el dosel pertenece a un determinado cultivar y el sistema de raíces pertenece a otro tipo de portainjerto.
- d. Los cuarteles deben tener igual sistema de riego, idealmente igual marco de plantación (espacio entre hileras) y similar sistema de conducción (Fig. 2.4). Los sistemas de conducción comprenden aspectos que controlan la forma de la planta y su vegetación, como altura del tronco, tipo de poda y emplazamiento de los sarmientos (Pszczółkowski 1992).

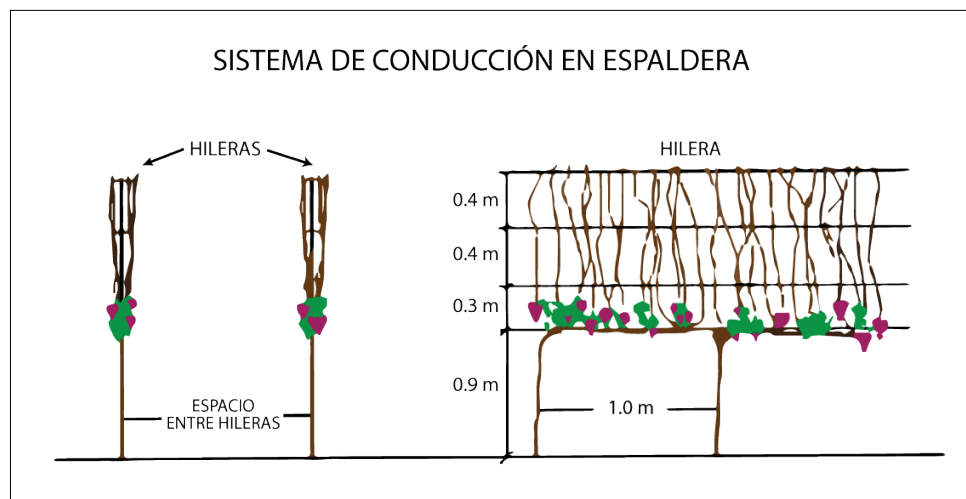


Figura 2.4 Sistema de conducción en espaldera con disposición de plantas en hileras, Imagen modificada de Jackson (2014).

e. Idealmente para cada cepa, se elegirá una viña orgánica o biodinámica y otra de manejo convencional, que implica el uso de agroquímicos.

f. Las viñas seleccionadas deben contar con un registro de las prácticas agrícolas. Es importante conocer el tipo de fertilizantes, plaguicidas y otros agroquímicos que se apliquen.

Estos parámetros se resumieron en una “Ficha para la selección de Unidades Piloto” (Documento A2.1; Anexos) la cual fue enviada a todos los productores pertenecientes al Consorcio Vinos de Chile, entidad que agrupa a más de 75 bodegas chilenas.

La selección de los viñedos comenzó con la postulación de 15 viñas, con un total de 50 predios vitivinícolas. Una vez recibidas las postulaciones de las viñas interesadas a ser sitio piloto y analizados los pares de viñas que cumplen con los criterios planteados, se elige estudiar viñas en las localidades de Casablanca y de San Antonio en cuarteles con el cultivar Pinot Noir, para el caso de los vinos espumantes, y a las viñas de Santa Cruz y San Javier para los cuarteles destinados a vinos tintos tranquilos del cultivar Carmenere.

Todas las viñas presentan plantas a pie franco\* (\*Glosario), riego por goteo, sistema de conducción del tipo “espaldera” (Fig. 2.4). El manejo agrícola de las viñas de Casablanca, San Antonio y San Javier es de tipo convencional, mientras que la viña de Santa Cruz trabaja con un manejo biodinámico. Los detalles de las viñas seleccionadas se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características de las viñas seleccionadas para la investigación.

Viña	Valle	Cepa	Año plantación	Unidad morfológica	Manejo Agrícola
Casablanca	Valle de Casablanca	Pinot Noir	2000-2004	Piedemonte Cordillera de la Costa	Convencional
San Antonio	Valle de San Antonio	Pinot Noir	2005-2008	Terrazas marinas alzadas en la Costa	Convencional
Santa Cruz	Valle de Colchagua	Carmenere	1998-2005	Piedemonte Cordillera de la Costa	Biodinámica
San Javier	Valle del Maule	Carmenere	1999	Cordillera de la Costa y Depresión Intermedia	Convencional

### 2.3.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO A NIVEL DE MICROCUENCA

El estudio a nivel de microcuenca forma parte de la información base o “*background*” geológico, geomorfológico, hidrogeológico, litológico y geoquímico sobre el cual se trabajará esta tesis doctoral. Para este trabajo se considera un levantamiento geológico y geomorfológico de la cuenca o microcuenca en la cual se emplaza el viñedo seleccionado, además de un estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de la microcuenca. El diseño de este trabajo se elabora en base a los estudios tradicionales de cartografía geológica e hidrogeología.



A continuación se describe en detalle la metodología aplicada en ambos estudios, la cual se divide en las etapas: trabajo de gabinete pre-terreno, campañas de terreno y trabajo de gabinete post terreno.

### 2.3.2.1 Levantamiento geológico y geomorfológico

El trabajo de gabinete, previo a terreno, incluye la recopilación de mapas y bibliografía geológica de la zona, al igual que el trabajo con imágenes satelitales de las áreas de estudio. En base al tamaño de las cuencas en estudio, se determina que la escala de trabajo a utilizar correspondería a 1:20.000.

La etapa de terreno fue desarrollada entre marzo y mayo de 2014 y tuvieron una duración de 5 a 7 días. El número de muestras de rocas y depósitos semiconsolidados o suelos, además de otros detalles específicos de las campañas de terrenos, pueden observarse en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Detalle de las campañas de terreno del levantamiento geológico y geomorfológico.

<b>Viña</b>	<b>Santa Cruz</b>	<b>San Javier</b>	<b>San Antonio</b>	<b>Casablanca</b>
<b>Valle</b>	Colchagua	Maule	San Antonio	Casablanca
<b>Fecha de terreno (2014)</b>	26-31 marzo	8-14 abril	2-7 mayo	8-12 mayo
<b>N° muestras de roca</b>	26	28	24	18
<b>N° muestras de depósitos</b>	8	14	20	11
<b>N° cortes petrográficos</b>	6	8	7	7
<b>N° análisis químicos</b>	5	5	5	5
<b>N° análisis granulométricos</b>	3	5	3	5
<b>Equipo geológico de terreno</b>	P. Castillo M. Contreras F. Lagos	P. Castillo M. Contreras F. Lagos	P. Castillo M. Contreras F. Lagos V. Maldonado	P. Castillo M. Contreras F. Lagos V. Maldonado

En terreno, la metodología de trabajo consiste en un levantamiento geológico a la escala 1:20.000 de los sectores aledaños a los viñedos, el cual incluye un reconocimiento de los afloramientos de roca que se encuentren en el área de estudio, en donde se describe el tipo de roca, forma y tamaño del afloramiento, relaciones de contacto y en la mayoría de los casos se toma una muestra de roca (Fig. 2.5) de cada unidad litológica, para el posterior análisis petrológico y geoquímico. Paralelamente, se realiza un levantamiento de los depósitos semiconsolidados y de los suelos presentes en la cuenca (Fig. 2.5). Para su muestreo se abre un hoyo de aproximadamente 40 cm de profundidad con chuzo y pala, recolectando sedimentos o suelo en una bolsa de plástico, además se hace una descripción del tamaño y forma del depósito, ubicación y pendiente, así como también de características físicas del suelo o sedimento recolectado (color, granulometría, forma de clastos, entre otros).



Figura 2.5. Fotografías del trabajo en terreno para el levantamiento geológico (arriba) y geomorfológico (abajo) del entorno de los viñedos y el muestreo de rocas, sedimentos y suelos asociado.

El trabajo de gabinete final corresponde a la digitalización de los mapas utilizando el software ArcGis, luego de considerar los análisis petrográficos y geoquímicos de las muestras de roca y los análisis granulométricos y geoquímicos de las muestras de depósitos y suelos, para la interpretación de las unidades geológicas. Mayores detalles de la metodología de trabajo se encuentran en Contreras *et al.* (2014), Lagos (2015) y Contreras (2017).

### **2.3.2.2 Hidrología, hidrogeología e hidrogeoquímica de la microcuenca**

La caracterización hidrológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica de las cuencas en estudio se realizó en dos temporadas de medición, específicamente temporadas Invierno 2015 y Verano 2016, con el objetivo de poder hacer comparaciones estacionales en los niveles de aguas subterráneas y en la química de éstas. Esta investigación fue llevada a cabo y desarrollada en la tesis de magíster de López (2018).

El trabajo pre-terreno corresponde a la recopilación bibliográfica y técnica de la hidrogeología de las cuencas en estudio, principalmente la información obtenida desde la Dirección general de aguas (DGA) para la localización de pozos. Además en ambas temporadas, para el muestreo geoquímico de aguas se realiza la preparación y lavado químico de los materiales.

Durante la temporada de invierno, los terrenos se llevan a cabo entre fines de julio y fines de septiembre del año 2015, por su parte, en la temporada de verano los terrenos se realizan desde mediados de enero a mediados de febrero de 2016. El trabajo en ambas temporadas consistió en la medición del nivel freático en pozos ubicados dentro de la microcuenca en

estudio, utilizando para ello un pozómetro (Fig. 2.6). En algunos pozos seleccionados se tomaron muestras de aguas subterráneas por medio de un colector Bailer (Fig. 2.6) y se midieron sus condiciones fisicoquímicas (pH, CE, T° y Eh). El número de pozos medidos y el número de muestras, entre otros detalles, se presentan en la tabla 2.3.



Figura 2.6. Medición de nivel freático en pozos con un pozómetro y muestreo de agua subterránea utilizando un colector Bailer.

Tabla 2.3. Detalles de mediciones de nivel freático y muestreo de aguas subterráneas en las temporadas Invierno 2015 y Verano 2016.

Viña	Temporada	Fecha mediciones y muestreo	N° pozos	N° muestras	Equipo de terreno
Casablanca	Invierno 2015	30 sept - 1 oct	22	2	S. López/ P. Castillo
	Verano 2016	25 - 30 enero	48	5	S. López / P. Salgado M. Contreras / H. Morales
San Antonio	Invierno 2015	21-23 agosto / 28-29 sept	10	2	S. López/ P. Castillo
	Verano 2016	18 - 24 enero	25	4	S. López / P. Salgado M. Contreras / H. Morales
Santa Cruz	Invierno 2015	17 - 19 agosto	13	3	S. López/ P. Castillo M. Contreras/ R. Valles
	Verano 2016	3 - 9 febrero	20	5	S. López / P. Salgado M. Contreras / H. Morales
San Javier	Invierno 2015	28 julio - 01 agosto	19	3	S. López/ P. Castillo
	Verano 2016	10 - 16 febrero	37	6	S. López / P. Salgado M. Contreras / H. Morales

Durante la etapa post-terreno se realiza el análisis de datos, generando mapas de isolíneas del nivel freático, se determinan las direcciones de flujo del agua subterráneas, además del análisis de otros parámetros físicos. Por su parte, se analizan los resultados de la química del agua, se generan controles de calidad de las mediciones y se modelan los datos.

La descripción específica de la metodología realizada en terreno y en las etapas de gabinetes referidos a la hidrogeología e hidrología de las cuatro cuencas en estudio, se encuentran en López (2018).



## 2.4 METODOLOGÍA DE ESTUDIO A NIVEL DE VIÑEDO

A nivel de viñedo o de cuartel\* (\*Glosario) se analizan las matrices suelo, agua de lluvia, agua de riego, y frutos. En este nivel de escala se consideran aquellas mediciones que se realizan en todas las calicatas seleccionadas, además aquellas matrices que se colectan dentro del viñedo, como es el caso de las muestras de aguas de lluvia y de riego.

Específicamente en este apartado se definen los criterios para la selección de los cuarteles y el posicionamiento de calicatas y además se realiza una descripción de la metodología utilizada para el levantamiento geológico-pedológico y para el muestreo y mediciones en perfiles de suelo, aguas y planta.

### 2.4.1 SELECCIÓN DE CUARTELES

Los cuarteles a estudiar fueron seleccionados una vez realizado el levantamiento geológico de la microcuenca; momento en el cual se tenía un reconocimiento de las litologías dominantes en las áreas de estudio y de la distribución y características sedimentarias de los depósitos semiconsolidados que se reconocen en cada viña.

La selección de los cuarteles se llevó a cabo en conjunto con los encargados de las viñas (viticultores y/o enólogos). Se eligen en cada viña uno a dos cuarteles de la misma cepa, e idealmente del mismo año de plantación, pero ubicados en distintas zonas dentro de cada viña, los parámetros utilizados en la selección de los sitios de muestreo correspondieron a:

1. Reconocimiento de los cuarteles plantados con el cv. Pinot Noir para las viñas de Casablanca y San Antonio y cv. Carmenere en las viñas de Santa Cruz y San Javier.
2. Al evaluar cada caso, se determinó el número de calicatas a estudiar en cada cuartel seleccionado, manteniendo un total de 12 plantas de vid o calicatas a estudiar en cada viña.
3. En cada cuartel seleccionado se define, con la ayuda de una imagen satelital, la ubicación aproximada de las calicatas, teniendo en consideración abarcar todo el cuartel y posicionar las calicatas en puntos equidistantes entre sí, tratando de alcanzar una malla de muestreo semi-regular, con una separación entre calicata menor a 200 m, idealmente entre 50 a 100 m.
4. En terreno se reconocen los puntos antes georeferenciados y en las inmediaciones a ese punto se selecciona una planta, basándose en que esta tenga un tamaño promedio, apariencia sana y que las plantas aledañas (en la misma hilera) tengan condiciones similares. La planta se marca con una estaca para individualizarla. La selección de las plantas que serían estudiadas fue realizada por el Ing. Agrónomo-Enólogo PhD. Ignacio Serra, investigador del proyecto.

5. Cada calicata se realiza directamente bajo la planta seleccionada para poder hacer un análisis entre el suelo y la planta.

6. En cada viña se selecciona al menos un sector que no esté cultivado en donde realizar una “calicata blanco”, correspondiente a un suelo idealmente con vegetación autóctona.

El interés de estudiar dos cuarteles dentro de cada viña, surge con el objetivo de evaluar diferentes mesoclimas\* (\*Glosario) y/o topografía, así como también para caracterizar y comparar suelos formados sobre diferentes materiales parentales dentro de un clima y de un manejo agrícola similar. Por su parte, el hecho de considerar una calicata dentro de un sector de la viña que no está cultivado tiene como finalidad evaluar posibles diferencias geoquímicas o mineralógicas en el suelo dado por la actividad agrícola.

En las viñas de Casablanca, San Antonio y Santa Cruz, se muestrean dos cuarteles dentro de la viña, sin embargo, en el sector de San Javier, se estudia un solo cuartel, por no contar con otro sector plantado con cepa Carmenere dentro del viñedo. Las características de los cuarteles seleccionados y los objetivos particulares a evaluar en cada viñedo, se muestran en la tabla 2.4. La ubicación de las calicatas se muestra en la figura 2.7.

Tabla 2.4. Características de los cuarteles seleccionados. En “Cuartel” se detallan el nombre interno para la viña y el nombre dado en esta investigación. PM: Piedemonte, Pend.: Pendiente, CM: Carmenere.

Sector viña	Cuartel	N° calicatas cult./no cult.	Año de plantación	Geomorfología	Observaciones
Casablanca	22 - PM	6/1	2004	Depósitos de piedemonte. Pendiente suave.	Diferencias en pendiente; evaluar diferencias en clima debido a exposición y granulometría para una misma litología del material parental.
	34 -Cerro	6/0	2000	Cerro isla, pendiente media a fuerte.	
San Antonio	12 - Terraza	9/0	2005	Terraza. Planicie.	Suelos con diferente uso de suelo, previo a la plantación de vides; evaluar diferencias en condiciones del suelo.
	15 - Pend.	3/1	2008	Terraza. Pendiente suave.	
Santa Cruz	209/210 - Isla	9/1	1998	Abanico aluvial. Baja pendiente.	Importantes diferencias en pendiente; evaluar diferencias en condiciones del suelo.
	216 - Pend.	3/1	2005	Cerro, pendiente media a fuerte.	
San Javier	CM - CM	12/1	1999	Planicie aluvial con lomajes suaves.	Sólo un cuartel plantado con Carmenere.

#### 2.4.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO EN PERFILES DE SUELOS

En el diseño de investigación planteado se propone realizar un estudio de los suelos considerando distintos niveles u horizontes, denominados A, B y C, los que también pueden ser

reconocidos como: nivel superficial generalmente con mayor contenido de materia orgánica o nivel lixiviado (horizonte A), nivel de acumulación de arcillas, con mayor contenido de raíces (horizonte B) y nivel profundo o nivel del material parental (horizonte C).

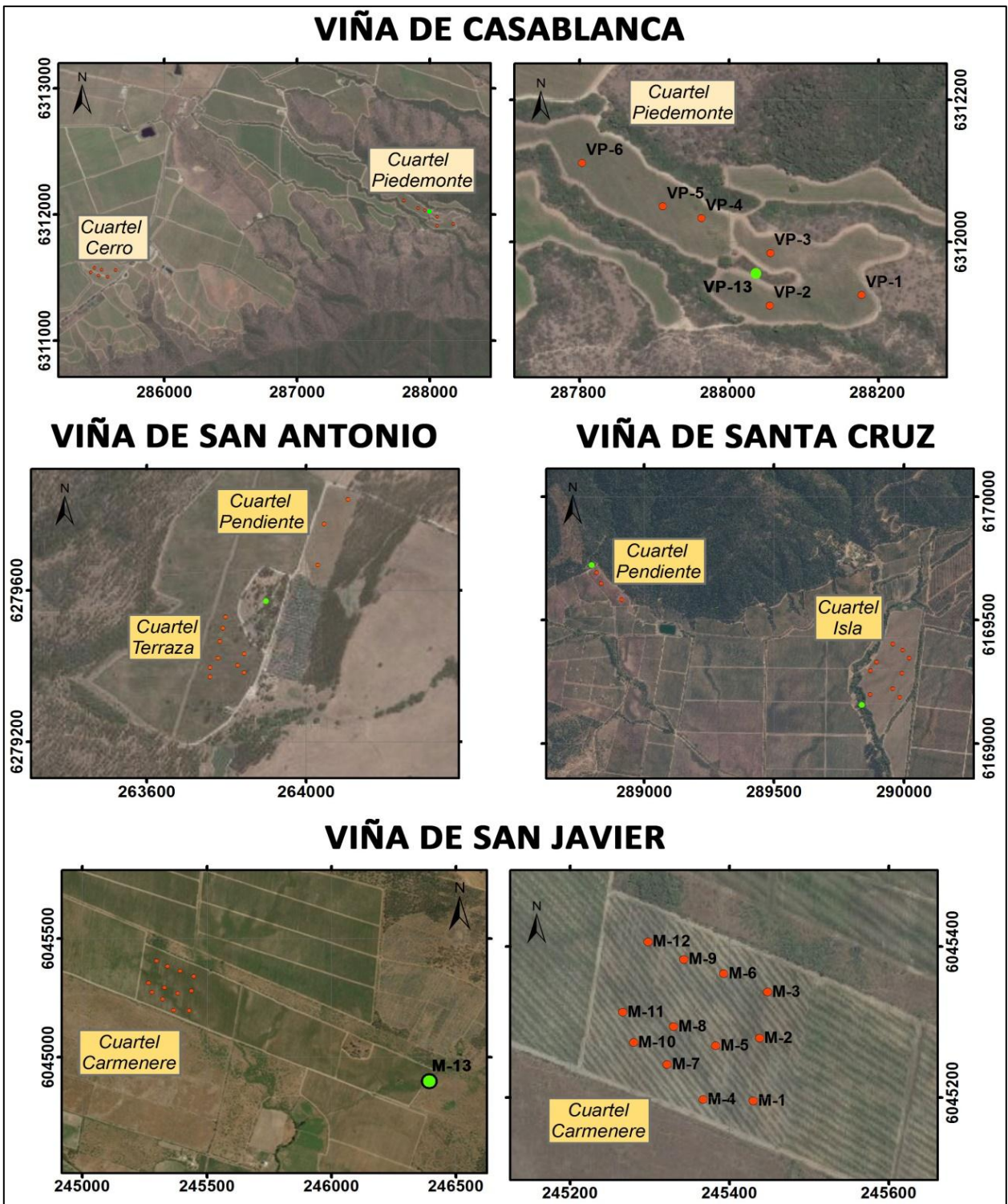


Figura 2.7. Posicionamiento de las calicatas cultivadas (puntos rojos) y calicatas no cultivadas (puntos verdes) dentro de cada viña en estudio.

Según el grado de influencia de los parámetros actividad antrópica (AA), procesos pedogenéticos (PP) y material parental (MP) los horizontes se consideran como:

- **Horizonte A:** Nivel con mayor influencia de la actividad antrópica (AA), en donde: AA>>PP>MP.
- **Horizonte B:** Nivel con mayor influencia de los procesos pedogenéticos (PP), en donde: PP>>AA~MP.
- **Horizonte C:** Nivel con mayor influencia del material parental (MP) o (en algunos casos) de procesos pedogenéticos (PP). En general, menor o casi nula influencia de la actividad antrópica (AA), en donde: MP>>PP>AA, MP~PP>>AA.

El estudio de los perfiles de suelo a través de calicatas, permitirá por una parte generar un mapeo geológico a una escala de mayor detalle (aproximadamente 1:5.000), dado el reconocimiento del material parental. Además, a partir de las trece a catorce calicatas será posible monitorear por horizontes, y a esta escala de trabajo, las condiciones fisicoquímicas *insitu* en el suelo durante cuatro temporadas, así como determinar las variaciones geoquímicas en el suelo en dos fases geoquímicas: fase biodisponible y en la química total del suelo, que incluye todas las fases mineralógicas presentes.

#### **2.4.2.1 Levantamiento geológico-pedogenético**

Esta actividad tiene dos objetivos principales por una parte hacer un reconocimiento del material parental para generar un mapeo geológico de mayor detalle y por otra parte, delimitar los horizontes a partir de los cuales se realizarán los sucesivos trabajos en el suelo.

El levantamiento geológico y pedogenético se realiza en las cuatro temporadas puesto que como fue explicado anteriormente, todas las calicatas se abrieron en sitios diferentes (ver Apartado 2.2) y toda la información fue considerada.

En terreno el trabajo consiste en la preparación de la calicata, despejando el perfil de suelo con una espátula o martillo para observar las variaciones de los distintos niveles del suelo, delimitación de los horizontes y descripción del perfil de suelo. La delimitación de los horizontes no se ajusta a parámetros de clasificación formal del suelo, el trabajo consiste en separar tres niveles (ocasionalmente dos o cuatro) que se categorizan en relación a variaciones en las condiciones físicas, considerando parámetros como: color, dureza (densidad), litología, granulometría o textura (contenido relativo de arena, limo y arcilla), estructura, porosidad, abundancia relativa de raíces, entre otros. Cabe destacar que además de variaciones

pedogenéticas, en algunos casos la separación de los horizontes estudiados, se realizó por consideraciones estratigráficas (diferentes capas o tipo litológico).

Posteriormente, se determina la profundidad de los horizontes, en la mayoría de las calicatas se delimitan los horizontes A, B y C, solo puntuales horizontes C2. Todas estas observaciones son registradas en una ficha particular para cada calicata.

Durante la etapa de gabinete post-terreno se realizan mapas geológicos, escala aproximada 1:5.000, en los cuales se registran las variaciones litológicas, determinadas por medio del reconocimiento del material parental de los perfiles de suelo descritos en terreno y se generan relaciones estratigráficas, en cuarteles donde el material parental corresponde a secuencias de depósitos semiconsolidados o a rocas estratificadas.

#### **2.4.2.2 Mediciones fisicoquímicas**

Los parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad eléctrica (CE) y temperatura (T°) son medidos durante las campañas Invierno 2014, Verano 2015, Invierno 2015 y Verano 2016. Las fechas exactas de las mediciones en cada viña se detallan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Fechas de las campañas de terreno para medición y muestreo de suelos en las cuatro temporadas de trabajo.

<b>Temporada</b>	<b>Casablanca</b>	<b>San Antonio</b>	<b>Santa Cruz</b>	<b>San Javier</b>
<b>Invierno 2014</b>	7-9 agosto 2014	5-6 agosto 2014	1-4 agosto 2014	28-31 julio 2014
<b>Verano 2015</b>	5- 14 enero 2015	20-26 enero 2015	29 ene.- 4 feb. 2015	10-16 febrero 2015
<b>Invierno 2015</b>	14-16 agosto 2015	21-23 agosto 2015	17-19 agosto 2015	28 jul.- 1 ago. 2015
<b>Verano 2016</b>	25-30 enero 2016	18-24 enero 2016	3-9 febrero 2016	10-16 febrero 2016

Específicamente los parámetros pH, CE y T° se miden *insitu*, es decir directamente en el suelo utilizando equipos portátiles diseñados especialmente para este fin. El pHímetro mide al mismo tiempo pH y temperatura, generando una compensación automática del pH según la temperatura a la cual se hace la medición. Por su parte, el potencial de óxido-reducción (Eh) fue medido en una solución de suelo, junto con los parámetros T°, pH y CE (Tabla A2.1; Anexos). El trabajo pre-terreno corresponde a la calibración de los equipos en condiciones controladas, realizadas en laboratorio a una temperatura estable de 25°C.

Durante las campañas de invierno las calicatas se excavan cercanas a la planta seleccionada para realizar las mediciones en el perfil de suelo que se encuentra directo bajo la planta (Fig. 2.3A), posteriormente durante las campañas de verano las calicatas se realizan en el lado opuesto al realizado durante la temporada anterior, esto porque tanto las mediciones



fisicoquímicas como el muestreo de suelo requiere que la estructura del suelo no se encuentre removida ni alterada.

Los parámetros *insitu* son medidos en el perfil de suelo en tres niveles, los que se ubican en el punto medio entre cada horizonte, haciendo cuatro mediciones por nivel, distanciados en 30 cm cada uno, siguiendo la malla que se observa en la figura 2.8B. En cada punto de medición se realiza un agujero (Fig. 2.8A), posteriormente los datos son tomados con equipos especiales para medir directo en el suelo (Fig. 2.8C y Tabla A2.1 en Anexos).

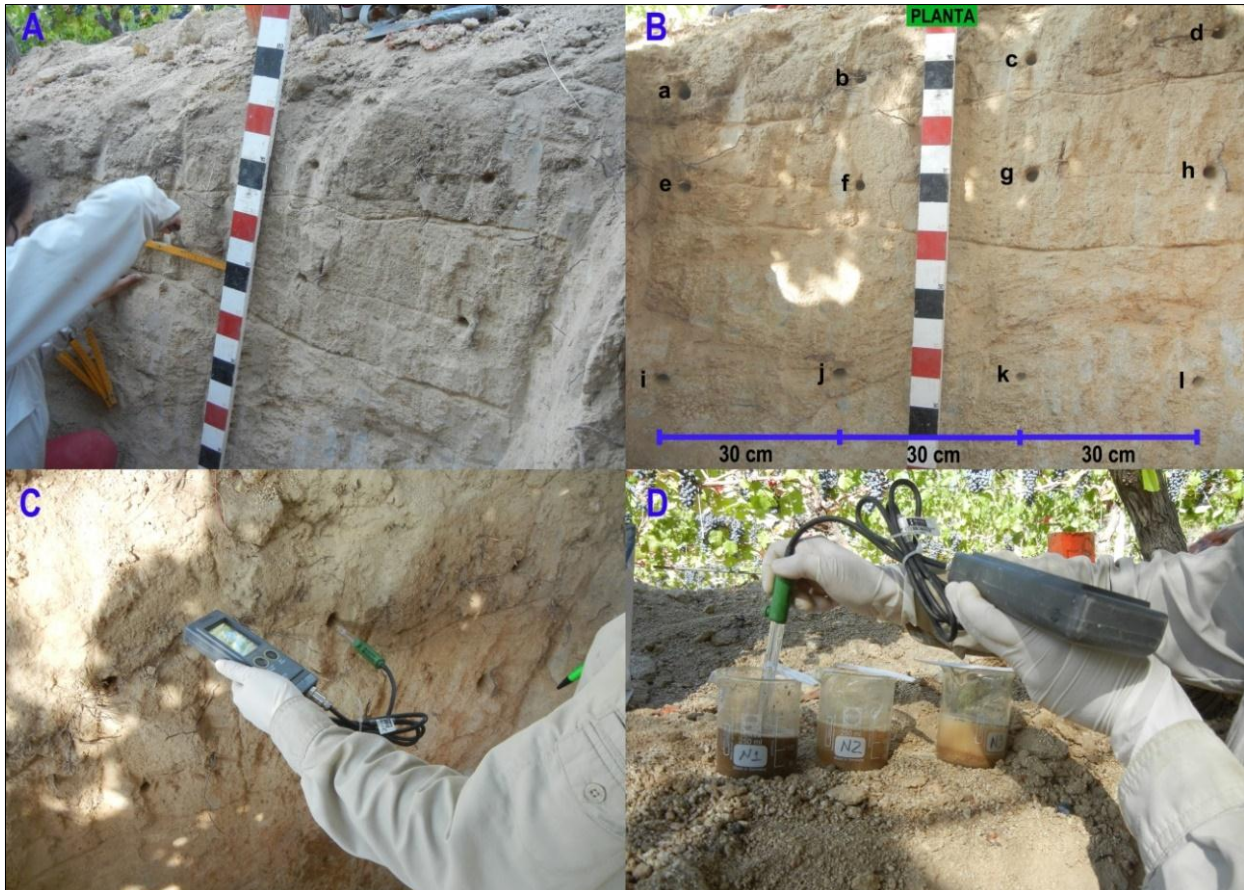


Figura 2.8 Fotografías de mediciones fisicoquímicas. (A) Realización de agujeros para medición de pH, CE y T° *insitu* en el suelo. (B) Malla de medición de parámetros fisicoquímicos *insitu*. (C) Medición directo en suelo con equipos portátiles específicos. (D) soluciones de suelo, preparados para los tres niveles.

Los parámetros medidos en solución se toman preparando una solución de suelo en una relación de: una porción de suelo por dos porciones de agua desmineralizada (1:2). La mezcla se hace en un vaso precipitado de vidrio el cual debe ambientarse primero con el suelo (Fig. 2.8D). La porción de suelo que se utiliza se saca entre los puntos centrales de la malla definida, es decir, entre los puntos b-c, f-g y j-k de la figura 2.8B. Una vez que la solución de suelo ha sido preparada esta se revuelve ágilmente para luego esperar dos minutos a que la solución se

estabilice, posteriormente la solución debe agitarse nuevamente, justo antes de realizar la medición con los equipos

El trabajo post-terreno consiste en la digitalización de los datos en planillas Excel, para el posterior análisis estadístico de los datos.

#### **2.4.2.3 Muestreo geoquímico del suelo**

Una vez realizadas las mediciones fisicoquímicas en el perfil de suelo, se lleva a cabo el muestreo geoquímico, las muestras para análisis de la fase biodisponible se muestrean en los horizontes A y B, mientras que las muestras para el análisis de química total del suelo se toman en todos los horizontes determinados (A, B, C, puntualmente C2).

En terreno, los materiales a utilizar para el muestreo de suelos son martillo geológico, pala de acero inoxidable, recipientes plásticos, colador plástico, bolsas de plástico de alta densidad, cinta adhesiva y guantes de látex. Estos materiales son preparados durante la etapa pre-terreno para todas las campañas de muestreo (Verano 2015 y Verano 2016).

A pesar de que ambos muestreos tienen características particulares, como se detallarán en los apartados siguientes, el orden de trabajo se realiza de manera conjunta; primero se muestrea el horizonte A para la medición de la fase biodisponible, luego se muestrea el mismo horizonte para el análisis de química total del suelo. Posteriormente se realizan ambos muestreos en el horizonte B, en el mismo orden anterior, y finalmente se muestrea el horizonte C (y en algunos casos horizonte C2) para analizar la química total del suelo.

Además, para análisis de control de calidad de ambas mediciones, en las campañas de muestreo de cada viñedo se colectan duplicados, el número de estas muestras corresponde a un 10% del total muestras obtenidas en cada tipo de muestreo.

##### **a. Muestreo de suelos para la fase biodisponible**

El muestreo de suelos para determinar los contenidos elementales de la fase biodisponible, se realiza durante las dos temporadas de verano (Verano 2015 y Verano 2016) para suelos cultivados, sin embargo, para suelos “blancos”, o de zonas no cultivadas, se realiza sólo durante la campaña Verano 2016. Las fechas en que se realizan estos trabajos en cada una de las viñas puede observarse en la Tabla 2.5.

El trabajo pre-terreno consistió en la investigación de una metodología analítica que permitiera el análisis químico de la fase biodisponible del suelo. De este modo, bajo los criterios definidos en nuestro estudio se propuso la utilización del método de extracción no selectiva MMI (Mobile

metal ion), para la determinación del contenido de elementos en estado disponible, es decir iones que no se encuentran acomplejados a fases minerales o coloidales del suelo, si no que están adsorbidas a partículas como arcillas o materia orgánica (Mann 2010), o bien en fases solubles o intercambiables, las cuales en presencia de agua (agua de riego o agua de lluvia) son de fácil incorporación a la solución del suelo y constituyen por lo tanto elementos (o nutrientes) biodisponibles para las plantas.

Las ventajas de esta técnica se relacionan a sus bajos límites de detección, posibilidad de analizar micronutrientes y elementos bioacumulables o tóxicos de manera multielemental, metodología de muestreo estandarizada, publicación de controles de calidad, además su aplicación ha sido documentada a escala continental en el análisis de la fase biodisponible en los suelos de Australia y Europa (Mann *et al.* 2012; Mann *et al.* 2014), así como también en su aplicación en suelos vitivinícolas (Mann 2012).

Las muestras para el análisis de MMI son normalmente tomadas a una profundidad de 10-25 cm en el suelo, ya que se reconoce que es la zona de máxima evapo-transpiración en la mayoría de los suelos (Mann *et al.* 2012).

Esta investigación además considera la medición de los elementos biodisponibles en la zona de mayor contenido de raíces; determinando así que el muestreo para esta fase del suelo se realizaría en una línea del horizonte A, a una profundidad de 10 a 25 cm y en otra línea de suelo correspondiente al horizonte B, en donde se concentraran las raíces finas; ambas líneas coincidentes con los niveles en que se midieron los parámetros fisicoquímicos (Figs. 2.9A y 2.9C).



Figura 2.9. Fotografías del muestreo geoquímico para elementos biodisponibles (A) Muestreo de suelo en la línea del horizonte A. (B) Tamizaje de suelo con colador de plástico de aproximadamente de 2 mm. (C) Línea de horizonte A muestreada.

En primera instancia, el trabajo en terreno consiste en remover con el martillo o pala la capa superficial de suelo u hojarasca (en inglés *litter*) y la cara expuesta del horizonte de suelo que será muestreado, con el objeto de evitar contaminación desde niveles superiores o desde el



suelo de otro horizonte. Luego en un recipiente de plástico, se colecta con el martillo o la pala el suelo desde la línea del horizonte A que se muestreará para ambientar el recipiente y el resto de materiales (Fig. 2.9A).

Posteriormente, con un martillo se obtiene la muestras de suelo desde la línea predefinida del horizonte A y se va almacenando en el recipiente plástico (Fig. 2.9A), luego la muestra se tamiza con un colador plástico para remover clastos o materia orgánica de tamaño mayor a 2 mm (Fig. 2.9B), obteniendo así la fracción más fina del suelo en una muestra de aproximadamente 1 kg. El suelo se colecta en una bolsa de plástico de alta densidad sellada con cinta adhesiva. Las mismas acciones se realizan para el muestreo del horizonte B y finalmente todas las muestras son pesadas en terreno.

El número de muestras colectadas para el análisis de elementos biodisponibles corresponde a 109 muestras en la temporada Verano de 2015 y 119 muestras para la temporada Verano 2016. El número de muestras tomado en cada viña así como el equipo que participó en el muestreo pueden observarse en la tabla 2.6. Finalmente, el trabajo post-terreno consiste en el orden y envío de muestras al Laboratorio SGS de Toronto (Canadá).

Tabla 2.6. Detalles de los muestreos de suelos en las campañas Verano 2015 y Verano 2016.

Viñas		Casablanca	San Antonio	Santa Cruz	San Javier
Verano 2015	N° muestras / N° duplicados suelo total	34 / 3	37 / 4	37 / 4	38 / 4
	N° muestras / N° duplicados fase biodisponible	24 / 3	25 / 3	24 / 3	24 / 3
	N° muestras mineralogía	34	37	37	38
	N° muestras propiedades físicas y químicas	18	18	18	13
	Equipo de terreno	P. Castillo M. Contreras S. López	P. Castillo S. López E. Cortés	P. Castillo S. López E. Cortés	P. Castillo M. Contreras P. Salas
Verano 2016	N° muestras / N° duplicados suelo total	3 / 0	4 / 0	7 / 1	4 / 1
	N° muestras / N° duplicados fase biodisponible	26 / 3	26 / 3	29 / 3	26 / 3
	N° muestras mineralogía	3	3	6	3
	N° muestras propiedades físicas y químicas	3	3	6	3
	N° muestras de respaldo	29	28	30	27
Equipo de terreno	P. Castillo M. Contreras P. Salgado H. Morales S. López	P. Castillo M. Contreras P. Salgado H. Morales S. López	P. Castillo M. Contreras P. Salgado H. Morales S. López	P. Castillo M. Contreras P. Salgado H. Morales S. López	

## b. Muestreo de suelos para química total

El muestreo para el análisis químico de todas las fracciones minerales presentes en el suelo; o también denominado en esta tesis como la química total del suelo, se realiza durante la temporada Verano 2015 para las muestras de suelo obtenidas desde las calicatas cultivadas en las cuatro viñas. Por su parte las muestras para química de suelo total en las calicatas “blanco” colectadas en zonas sin cultivo, se lleva a cabo en las campañas de terreno de la temporada Verano 2016. Las fechas exactas en que se desarrollan estos muestreos en cada viña, se detallan en la tabla 2.5.

El trabajo pre-terreno consiste en la determinación de la metodología de trabajo y en la elección de la metodología analítica y del laboratorio al cual se enviarían las muestras.

En terreno, el muestreo de suelo para química total se realiza posterior al muestreo para la fase biodisponible en cada horizonte. El muestreo se realiza con un martillo y el suelo se recolecta en un recipiente plástico, la muestra se saca por incrementos desde todo el horizonte, sin discriminar la presencia de clastos mayores (Fig. 2.10A). El suelo colectado en el recipiente se va vaciando en la bolsa de plástico, repitiendo hasta recuperar al menos 2 kg de suelo, luego la bolsa se sella herméticamente con cinta adhesiva (Fig. 2.10B).



Figura 2.10. Muestreo de suelo para análisis geoquímico total en todos los horizontes o niveles. (A) Muestreo con martillo y recipiente de plástico. (B) Modo de embalaje de muestras. (C) Total de muestras de suelo tomadas en todas las calicatas en temporada Verano de 2015.

El suelo se colecta desde los tres o cuatro horizontes previamente determinados, comenzando desde el horizonte más superficial hasta el más profundo, repitiendo la misma metodología para cada muestra. Las muestras, para todas las mediciones, son pesadas en terreno (Fig. 2.10C) y ensacadas para su transporte.

El número de muestras obtenidas en la temporada Verano 2015 es de 161 muestras, mientras que en la temporada Verano 2016 se recogen 20 muestras, la mayoría de las cuales

corresponden a muestras de suelo de las calicatas “blanco” y un número menor son muestras de suelo de zonas cultivadas, las que se incluyen para el control de calidad de las mediciones.

Finalmente, el trabajo post-terreno consiste en el orden y el envío de las muestras al laboratorio previamente seleccionado.

#### **2.4.2.3 Muestreo de suelo en calicatas seleccionadas**

En cada cuartel\* se seleccionan cinco a seis de calicatas que se muestrean con el objetivo de realizar análisis adicionales a escala de calicatas.

Estos análisis corresponden a la determinación de la mineralogía de los suelos por medio de Difracción de rayos X y además a análisis de rutina en suelos como son determinación de color con Tabla Munsell, densidad aparente\* (\*Glosario), textura\*, contenido de materia orgánica (C orgánico) y determinación de la capacidad de intercambio catiónico\* (CIC). La metodología de muestreo se describe a continuación:

##### **a. Muestreo de suelo para análisis mineralógico**

Esta muestra se obtiene posterior a la muestra para análisis químico de suelo total y su metodología de colección es la misma, recolectando aproximadamente 3 kg de suelo, por medio de incrementos desde todo el horizonte, en todos los horizontes definidos. Las muestras son embaladas en bolsas de plástico de alta densidad, pesadas en terreno y ensacadas para transportarlas (Fig. 2.10). Las muestras son obtenidas desde todos los puntos de muestreo, sin embargo, el análisis mineralógico se realiza sólo para las calicatas seleccionadas.

El trabajo de gabinete consiste en el secado de la muestra en horno de laboratorio durante tres días, a una temperatura que no supere los 35°C, con el objetivo de eliminar la humedad del suelo y no alterar la estructura cristalina de las arcillas. Posteriormente el suelo se tamiza en diferentes fracciones. La fracción fina (tamaño limo y arcilla) o malla #200 se cuartea y se separan dos alícuotas de 10 gr para análisis de mineralogía limo-arcilla (fracción limo y arcilla) y para separación y determinación de filosilicatos. El resto de material se reserva para posibles análisis mineralógicos adicionales.

La separación de la fracción de arcillas y determinación de minerales de arcillas o filosilicatos fue llevado a cabo e investigado por la alumna memorista Paulina Salgado, por tanto, mayores detalles de la preparación de muestra en laboratorio y análisis de Difracción de rayos X, pueden obtenerse en Salgado (2019).

## b. Muestreo de suelo para análisis de propiedades físicas y químicas del suelo

En cada calicata seleccionada se muestrean agregados de suelo (terrones) para realizar el análisis de densidad aparente\* (\*Glosario) por el método del terrón (Sandoval *et al.* 2011). Para preservar los terrones durante el transporte de la muestra, ésta se almacena en envases de plástico (Figs. 2.11A y 2.11B). La muestra es obtenida con martillo desde todo el horizonte de suelo y, en general, los terrones se van colectando en la medida que se van obteniendo las muestras para suelo total y para granulometría. Finalmente, para rellenar los envases de plástico se colecta suelo disgregado, dispuesto entre los terrones hasta llenar el envase, luego éste se tapa y se sella con cinta adhesiva, lo más compacto posible. En suelos con menor densidad, algunos terrones son conservados envolviéndolos firmemente con film plástico.



Figura 2.11. (A) Muestreo de terrones. (B) Embalaje de muestras para análisis físico y químico de suelos. (C) Muestras de los tres horizontes. (D) Tabla Munsell para determinación de color de suelos.

En laboratorio la muestra es destapada, para determinar el color de ésta utilizando la Tabla Munsell que se basa en el Sistema de color de Munsell (1915), el cual es reconocido como el sistema oficial para la medición del color en suelos (Figs. 2.11C y 2.11D). Una vez separados los terrones a utilizar para el análisis de densidad aparente\*, la muestra restante se homogeniza y cuartea para realizar posteriores análisis como textura de suelo\* por el método de hidrómetro y análisis químicos, tales como determinación de la materia orgánica del suelo y de la capacidad de intercambio catiónico\* (CIC).

### 2.4.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA MUESTRAS DE AGUAS

En cada viñedo se obtienen muestras de agua de lluvia en las temporadas Invierno 2014 (I14) e Invierno 2015 (I15) y además se colectan muestras de agua de riego y del tranque de acopio en los veranos 2015 y 2016 (V15 y V16). Durante las cuatro temporadas, a todas las muestras de agua, se midieron los parámetros fisicoquímicos: conductividad eléctrica (CE), temperatura ( $T^{\circ}$ ), pH y potencial de óxido-reducción (Eh). Sin embargo, el análisis químico de las muestras de agua se realizó solamente en las muestras obtenidas en las campañas de I15 y V16. El número de muestras para cada matriz de agua y la fecha de su colección se presenta en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Detalle y fechas de las mediciones fisicoquímicas y muestreo de aguas de lluvia y de riego.

	Viña	Casablanca	San Antonio	Santa Cruz	San Javier
Agua de lluvia	Fecha de instalación de colectores I14	7 agosto 2014	5 agosto 2014	1 agosto 2014	28 julio 2014
	Fecha precipitaciones I14	23-24 agosto 2014	23-24 agosto 2014	23-24 agosto 2014	31 julio 2014
	Fecha colección muestra I14	26 agosto 2014	26 agosto 2014	27 agosto 2014	31 julio 2014
	Nº muestras I14	2	2	2	2
	Fecha de instalación de colectores I15	13 julio 2015	14 julio 2015	14 julio 2015	15 julio 2015
	Fecha precipitaciones I15	5-10 agosto 2015	1-10 agosto 2015	1-10 agosto	15-28 julio 2015
	Fecha colección muestra I15	14 agosto 2015	21 agosto 2015	17 agosto	28 julio 2015
	Nº muestras I15	2	2	1	2
Agua de riego	Fecha muestreo aguas de riego V15	12-14 enero 2015	24-26 enero 2015	2-4 febrero 2015	14-16 febrero 2015
	Nº muestras de riego V15	6	5	6	4
	Fecha muestreo aguas de riego V16	29-30 enero 2016	23-24 enero 2016	7-9 febrero 2016	15-16 febrero 2016
	Nº muestras de riego V16	3	1	2	2

### 2.4.3.1 Muestreo de aguas lluvias

El muestreo de aguas de lluvia se realiza en las campañas de invierno utilizando para esto un “colector de aguas lluvias” el cual fue construido en base al diseño presentado en Álvarez (2015), con algunas modificaciones. Estos colectores constan de un balde de 20 litros dentro del cual se adhiere un recipiente de plástico de 2 litros, donde se recoge el agua lluvia. En la tapa del balde se instala un embudo para canalizar el agua hacia el recipiente y sobre él una malla para proteger el agua de la interacción directa con el medio ambiente (Figs. 2.12A y 2.12B).

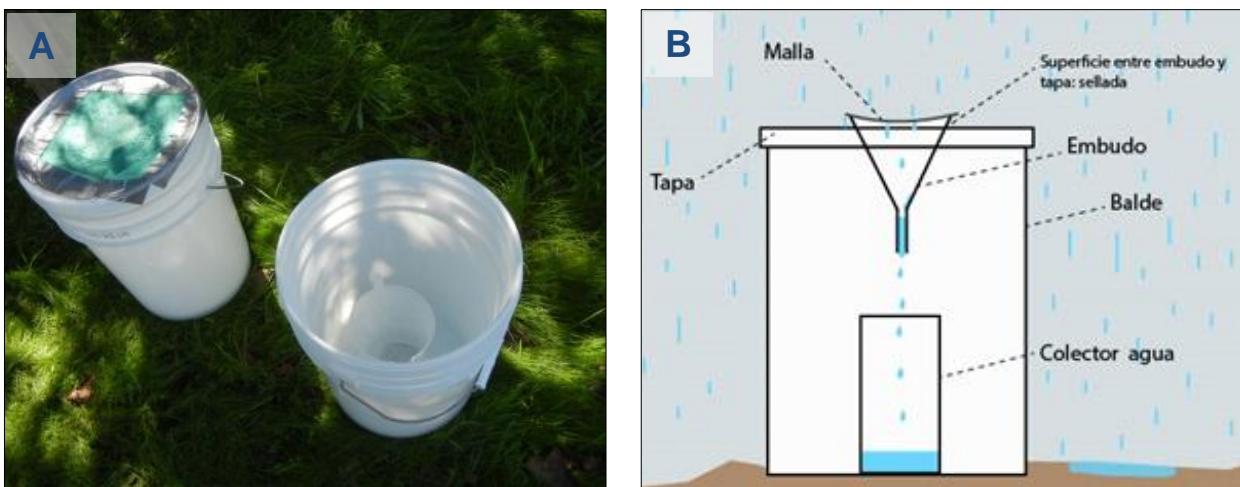


Figura 2.12. (A) Colectores de agua lluvia; (B) Esquema de colectores, obtenido de López (2018).



Tanto el embudo como el recipiente y las botellas donde se muestreó el agua, fueron previamente remojadas durante dos días en una solución de agua destilada con HNO<sub>3</sub> al 10%, con el objetivo de remover las impurezas que podría presentar el plástico.

En terreno, dos colectores son instalados en cada viña (Figs. 2.13A a 2.13D), durante la selección de las calicatas, y éstos se mantienen en los campos hasta la ocurrencia de un frente de lluvia, momento después del cual se acude para la colección de la muestra.

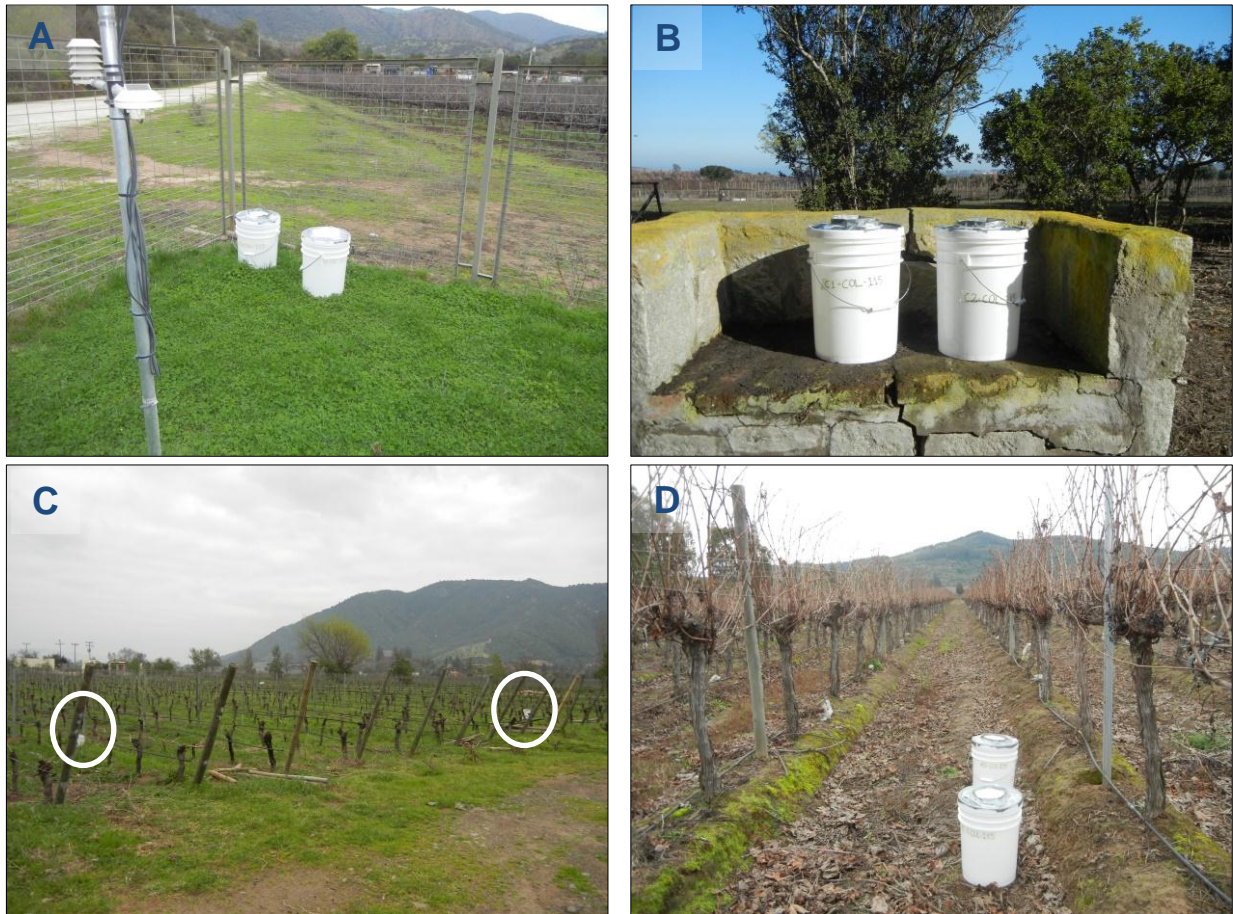


Figura 2.13. (A) Colectores de agua lluvia instalados en la temporada Invierno 2015 en las viñas de Casablanca; (B) San Antonio; (C) Santa Cruz y (D) San Javier.

En primera instancia se separa en un vaso precipitado una fracción del agua contenida en el recipiente colector, para realizar tres mediciones de los parámetros fisicoquímicos (CE, pH, Eh y T°) con los equipos portátiles, con el fin de obtener un promedio para cada muestra. Posteriormente, directamente desde el recipiente colector, se toma el agua de la muestra con una jeringa, la cual es ambientada 3 veces con el agua a muestrear. La jeringa se rellena con agua y se le pone un filtro de 0,2 µm (Fig. 2.14). Cada muestra es tomada en dos tubos Falcon de 50 ml y en una botella de plástico de alta densidad de 100 ml (un tubo para análisis de cationes, el otro para elementos trazas y la botella para análisis aniones), los tubos y la botella

se ambientan 3 veces con el agua filtrada. Finalmente se procede a llenar los tubos Falcon y luego se les agrega 1 ml de ácido nítrico Suprapur® para evitar la precipitación de fases. Para los aniones se llena la botella hasta el tope, dejar sin burbujas. Las muestras se guardan a una temperatura menor a 3°C, hasta que son enviadas al laboratorio.



Figura 2.14. Materiales para mediciones fisicoquímicas y muestreo de aguas, detalle de filtros de 0,2  $\mu\text{m}$ .

Inconvenientes durante la temporada Invierno 2015 se presentaron en el muestreo de aguas lluvias de Santa Cruz (Fig. 2.13C), en donde uno de los colectores se encontraba con barro y el agua muy turbia, lo que indica un posible volcamiento de éste, por tanto, se descartó el muestreo del agua recogida en el colector en cuestión. Por su parte, en la viña de Casablanca (Fig. 2.13A) una de las dos muestras de aguas de lluvia, presenta una gran cantidad de burbujas, se presume que algún producto químico pudo haber caído dentro del colector, sin embargo, la muestra es igualmente mandada a análisis.

#### **2.4.3.2 Muestreo de aguas de riego y acopio**

La selección de los puntos de muestreo de las aguas de riego, corresponden a goteros que se encuentren dentro del cuartel estudiado o en cuarteles aledaños. En cada viñedo se elige uno a dos puntos de muestreo.

En cada punto seleccionado se instalan, directamente bajo un gotero, 2 a 3 vasos plásticos de alta densidad, en los cuales se recolectan gota a gota un total de 250 ml de agua (Fig. 2.15A). Además en todas las viñas, se muestrea el agua del tranque o el agua de la piscina de acopio de agua para riego (Fig. 2.15B), para esto se utiliza un balde vacío de agua desmineralizada, el cual se ambienta tres veces con el agua del tranque, antes de coleccionar la muestra. Posteriormente, para las mediciones fisicoquímicas y la obtención de la muestra de agua de riego se utiliza la misma metodología utilizada para la de agua de lluvia (Fig. 2.14).





Figura 2.15. Muestreo de aguas de riego desde goteros y desde tranques.

#### 2.4.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA MUESTRAS DE BAYAS

La interacción entre el suelo, las condiciones medioambientales y la planta será estudiada mediante el análisis químico de frutos. Los frutos de igual cultivar\* (\*Glosario) serán cosechados a un mismo grado de madurez, este parámetro se determina mediante la medición de los grados brix\*, procurando que éstos sean similares en ambos viñedos al momento de la toma de las muestras; además en base al trabajo de Bertoldi *et al.* (2011) se determina que las bayas se cosechen al menos 20 días después de la pinta\*, ya que se comprueba que pasado este periodo las concentraciones de la mayoría de los elementos químicos se encuentran estabilizados en los frutos.

En cada viña se toman muestras de frutos de las 12 plantas seleccionadas, además para aumentar la representatividad de la muestra, se muestrean racimos de dos a tres plantas aledañas a la planta seleccionada. El número total de muestras en cada viña corresponde a 13 muestras (Tabla 2.8), obteniendo una muestra duplicado en cada área de estudio.

Tabla 2.8. Fecha de muestreo y número de muestras en muestreo de bayas.

Viña	Casablanca	San Antonio	Santa Cruz	San Javier
<b>Fecha muestreo frutos 2015</b>	25 Febrero 2015	3 Marzo 2015	18 Abril 2015	17 Abril 2015
<b>N° muestras frutos 2015</b>	13	13	13	13
<b>Fecha muestreo frutos 2016</b>	8 Marzo 2016	9 Marzo 2016	21-22 Marzo 2016	23-24 Marzo 2016
<b>N° muestras frutos 2016</b>	13	13	13	13

En cada sitio de muestreo se toma un total de 350 bayas, de las cuales 300 bayas son destinadas al análisis químicos y 50 bayas se utilizan para medir los grados brix\*. Las bayas se colectan desde racimos de tamaño promedio, situados en las zonas interior y exterior del dosel\* y en ambas exposiciones de la hilera, y desde distintos puntos del racimo, es decir, sector superior, inferior y medio del racimo, procurando además que el tamaño de la baya sea también



de un tamaño promedio. Cada baya se colecta cortando el pedicelo con una tijera y luego se guardan en una bolsa de plástico de alta densidad, además para evitar la contaminación de las muestras, se utilizan guantes de latex para la colección de las bayas (Fig. 2.16).



Figura 2.16. Muestreo de bayas para análisis químico y bioquímico.

## 2.5 NUMERACIÓN DE MUESTRAS

La numeración de muestras de suelo y frutos, se realiza en un código que indica: Viña y cuartel, temporada y año, número de calicata, horizonte/tipo de muestra. Las muestras de roca se catalogan por: Viña y símbolo de roca (R), número de muestra en orden correlativo y para las muestras de aguas se utiliza un código que indica: Tipo de muestra, temporada y año, viña y número de muestra (Tabla 2.9).

Tabla 2.9. Sistematización de la numeración de muestras.

	Casablanca	San Antonio	Santa Cruz	San Javier
<b>Viña/cuartel</b>	VP, VC y V	CT, CP y C	LI, LP y L	M (Ms y Mv)
<b>Temporada/año</b>	I14 (Invierno 2014); V15 (Verano 2015); I15 (Invierno 2015); V16 (Verano 2016)			
<b>Número muestra</b>	Mediciones en calicatas y planta (correlativo 1 a 14); Rocas y aguas: correlativo.			
<b>Tipo de muestra</b>	Suelo Total	AQ (Hzte A); BQ (Hzte B); CQ (Hzte C); DQ (Hzte C2). Ej.: CT-V15-4-AQ		
	Fase Biodisponible	AM (Hzte A); BM (Hzte B). Ej.: LP-V16-11-BM		
	Mineralogía	AG (Hzte A); BG (Hzte B); CQ (Hzte C); DG (Hzte C2). Ej.: Mv-V15-5-CG		
	Prop. fcas/qcas	AD (Hzte A); BD (Hzte B); CD (Hzte C); DD (Hzte C2). Ej.: VC-V15-9-AD		
	Frutos	F (frutos). Ej.: CP-V16-10-F		
	Rocas	R (roca). Ej.: VR-4		
	Aguas	RW (Aguas lluvia). Ej.: RW-I15-L1		
		IW (Agua de riego). Ej.: IW-V16-M2		
GW (agua subterránea). Ej.: GW-I15-V8				
SW (aguas de escorrentía). Ej. SW-I15-L1				

## 2.6 METODOLOGÍAS ANALÍTICAS

Las metodologías analíticas utilizadas para las matrices roca, suelo, aguas y frutos se describen de forma resumida pero específica en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Descripción de las metodologías analíticas utilizadas en la investigación (\* ver Glosario).

Matriz	Metodología
Roca	<p><b>Química de roca total:</b> Las muestras son pulverizadas hasta la fracción &lt;74 <math>\mu\text{m}</math>, luego se cuartea y analizan tres alícuotas de 1 g. La primera alícuota se pesa y se calcina a 1000°C, para medir la pérdida de agua por diferencia de peso (LOI). Luego 1 g de muestra se mezcla con meta/tetraborato de litio en un crisol, la mezcla se funde en un horno y el resultado es enfriado y redisolto en ácido nítrico, la medición se hace por ICP-OES para determinar óxidos mayores y por espectroscopia de masa (ICP-MS) para elementos menores y traza. La tercera alícuota es digerida en una solución de “Agua regia modificada” y analizada por ICP-MS para la determinación de metales y metaloides. El análisis químico de rocas se realiza en el Laboratorio Bureau Veritas (Vancouver, Canadá).</p> <p><b>Petrografía de roca:</b> Los cortes transparentes son realizados en el taller de cortes de la Universidad de Chile. La descripción petrográfica se realiza en microscopios de luz polarizada en la Universidad de Concepción (Contreras 2017).</p>
Suelo	<p><b>Geoquímica y Química</b></p> <p><b>Química de suelo total:</b> Igual metodología y laboratorio detallados en la Química de roca total.</p> <p><b>Fase biodisponible:</b> En laboratorio la fracción de suelo &lt;2 mm es sometido a una digestión parcial mediante una solución en base a agua, que contiene ligandos orgánicos e inorgánicos, durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente se realiza la lectura por ICP-MS (Método MMI, Laboratorio SGS, Canadá).</p> <p><b>Capacidad de intercambio catiónico* (CIC):</b> Se mide la suma total de los cationes Ca, Mg, K y Na intercambiables de un suelo, por el método de saturación con acetato de amonio (<math>\text{CH}_3\text{COONH}_4</math>) 1N a pH 7 (Rhoades) y lectura por espectrofotometría, según metodología en Sadzawka <i>et al.</i> (2004).</p> <p><b>Contenido de materia orgánica (MO):</b> La muestra de suelo se seca al aire. Una alícuota de 1 a 2 g se somete a una oxidación en una solución de dicromato de sodio, ácido sulfúrico y agua, que se deja reposar por 12 a 15 h. La lectura se realiza por Colorimetría (Sadzawka <i>et al.</i> 2004). Análisis realizados en el Laboratorio de Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción.</p>
	<p><b>Física</b></p> <p><b>Textura*:</b> Se determina mediante el método del hidrómetro (Bouyoucos), la muestra de suelo se seca a 40°C, se extrae la fracción mayor a 2 mm. Luego se dispersan 50 g suelo con hexametáfosfato de sodio. En una probeta de sedimentación de 1 L, se mide con un hidrómetro la densidad después de 40 segundos y de 7 horas de sedimentación, para calcular la proporción relativa de arena, limo y arcilla, según la metodología descrita en Sandoval <i>et al.</i> (2011).</p> <p><b>Densidad aparente*:</b> La densidad aparente se mide por el “Método del terrón” (Sandoval <i>et al.</i> 2011), utilizando terrones de suelo no perturbados de 2 a 4 cm de diámetro, éstos se secan al aire y luego son recubiertos en una película de parafina sólida, la densidad de determina a través del volumen desplazado, por medio de repetitivos pesajes en aire y agua. Análisis realizados en el Laboratorio de Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción.</p>
	<p><b>Mineralogía</b></p> <p><b>Mineralogía limo-arcilla:</b> La fracción limo-arcilla del suelo es triturada en un mortero se ágata hasta &lt;20 <math>\mu\text{m}</math>, las muestras se montan con una orientación al azar y se disponen en un Difractómetro de rayos X D2Phase, que usa radiación <math>\text{CoK}\alpha</math> (<math>\lambda=1,789 \text{ \AA}</math>), midiendo desde 3° a 65° 2<math>\theta</math>, con condiciones de excitación de 30 kV de voltaje y 10 mA y con un <i>scan step</i> de 0,02° y en un tiempo de conteo de 28 min. La identificación de las fases minerales son realizadas con el software EVA y la semicuantificación con el software TOPAS. Los datos son validados con análisis químicos de fluorescencia de rayos X. Estos análisis son realizados en el Laboratorio Geoatacama, La Serena.</p> <p><b>Mineralogía de arcillas:</b> A partir de la muestra limo-arcilla, se realiza una separación de la fracción arcilla través de centrifugado y filtrado, luego se monta una muestra orientada en un portamuestra de vidrio. Las muestras se tratan secuencialmente con etilenglicol, seguido de calentamiento a 375°C y 550°C, obteniendo cuatro lecturas de DRX. El análisis se realiza en un Difractómetro Bruker D4 Endeavor, que usa radiación <math>\text{Cu-K}\alpha</math> con filtro de Ni (<math>\lambda=1,5506 \text{ \AA}</math>), con condiciones de excitación de 40 kV y 20 mA. Los datos son colectados entre 3° a 50° 2<math>\theta</math>, con un <i>scan step</i> de 0,02° y en un tiempo de conteo de 28,2 s. La identificación se realizó con el software Bruker EVA y la semicuantificación con los factores propuestos por Biscaye (1965). Además, para la determinación de vermiculita, una parte de la muestra es saturada con KCl y MgCl, luego calentada a 375°C y 550°C y se realiza las lecturas de DRX con los parámetros antes descritos. Los análisis se desarrollan principalmente en los laboratorios del Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) y parcialmente en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Forestales, ambos de la Universidad de Concepción (Salgado 2019).</p>

Matriz	Metodología
Aguas	<p>Las muestras de agua son analizadas directamente (sin tratamientos adicionales) según las siguientes metodologías:</p> <p><b>Alcalinidad:</b> Las muestras de agua sin acidificar se miden por volumetría acido-base para determinación de bicarbonato (<math>\text{HCO}_3^-</math>). En terreno se realiza adicionalmente un análisis de bicarbonato por titulación, utilizando naranja de metilo y HCl, metodología descrita en López (2018).</p> <p><b>Cationes:</b> Las muestras de agua acidificada en terreno se analizan por Espectroscopia de absorción atómica (AAS) para determinación de los cationes <math>\text{Ca}^{2+}</math>, <math>\text{Mg}^{2+}</math>, <math>\text{Na}^+</math>, <math>\text{K}^+</math>, <math>\text{Li}^+</math>.</p> <p><b>Aniones:</b> Las muestras de agua sin acidificar es analizada por Cromatografía iónica (IC) para determinación de los aniones <math>\text{SO}_4^{2-}</math>, <math>\text{Cl}^-</math>, <math>\text{NO}_3^-</math>.</p> <p>Análisis realizados en los laboratorios de SERNAGEOMIN, Santiago.</p> <p><b>Metales y elementos traza:</b> Las muestras de agua acidificada en terreno se analizan por Espectroscopia de masa (ICP-MS) según el análisis SO200 en el Laboratorio Bureau Veritas (Vancouver, Canadá).</p>
Frutos	<p><b>Análisis químico de nutrientes:</b> Las muestras de bayas son lavadas con agua destilada, posteriormente se realiza un jugo mediante un macerado con toda la fruta: piel, semillas y pulpa. Para la lectura de N se utiliza la metodología Kjeldahl, para P y B se usa el método Fotocolorimétrico, para K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu se hace lectura por ICP-OES y Cl se determina mediante Potenciometría. Análisis realizado en el Laboratorio Agrolab, Santiago.</p> <p><b>Análisis de metales y elementos traza:</b> Una submuestra del jugo macerado en los análisis antes descritos, es analizado por Espectroscopia de masa (ICP-MS), en los laboratorios de SERNAGEOMIN, Santiago.</p>

## CAPITULO 3. GEOLOGÍA Y GEOGRAFÍA DE LAS AREAS DE ESTUDIO

### 3.1 MARCO MORFOLÓGICO Y GEOGRÁFICO REGIONAL

Las áreas de estudio se encuentran ubicadas en la Zona Central de Chile entre los 33°15' y los 35°45' de Lat. S (Fig. 3.1). La Zona Central está caracterizada por un clima mediterráneo (ej. Le Roux 2012; Montes *et al.* 2012) con precipitaciones anuales concentradas en los meses de invierno, que varían en promedio de los últimos 10 años entre 300 mm en el norte hasta 1300 mm hacia el sur (DGA 2016; Cosio *et al.* 2007) y una temperatura media anual que disminuye en términos generales desde 15° en la zona más al norte a 13°C hacia el sur (DGA 2016).

En este segmento, Chile Central presenta tres unidades morfológicas principales: Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia y Cordillera de los Andes; las viñas estudiadas se localizan principalmente en el piedemonte e inmediaciones de la Cordillera de la Costa.



Figura 3.1. Ubicación y contexto regional de las viñas en estudio. Imagen modificada de Google Earth.

La vegetación natural que se reconoce en sectores puntuales de esta zona del territorio, se clasifica en Gajardo (1994) como “Región del matorral y del bosque esclerófilo” en que predominan arbustos, suculentas y árboles esclerófilos y laurifolios, tales como: “litre”, “boldo”, “espino”, “maitén”, “quillay” y “canelo”, entre otros.



De acuerdo al último Censo (INE 2017), cerca del 73% de la población vive en Chile Central, concentrada principalmente en la ciudad de Santiago (Región Metropolitana). Por otra parte, las principales actividades productivas en las zona de Casablanca es la actividad agrícola, mientras que en el área de San Antonio, la actividad portuaria predomina por sobre la agricultura y la avicultura (cría de aves). Ambas áreas están ubicadas cercana a urbes altamente pobladas, tales como Santiago, Valparaíso y San Antonio, y a zonas industriales. Por otra parte, las viñas del sur, Santa Cruz y San Javier, se ubican cerca de ciudades menos pobladas, en donde la agricultura es la actividad económica más relevante.

## 3.2 GEOGRAFÍA Y GEOLOGÍA A NIVEL DE CUENCA EN CASABLANCA

### 3.2.1 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA DE CASABLANCA

La microcuenca de Casablanca de 83 km<sup>2</sup> de área (Fig. 3.2), corresponde a la sección norte de la subcuenca del estero Los Perales (López 2018). Ésta se encuentra ubicada en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa, a 30 km de la línea de costa actual. El cordón montañoso que rodea a la cuenca, posee cotas que varían entre 300 a 700 m s.n.m. con pendientes de 50 a 20° (Lagos 2015).

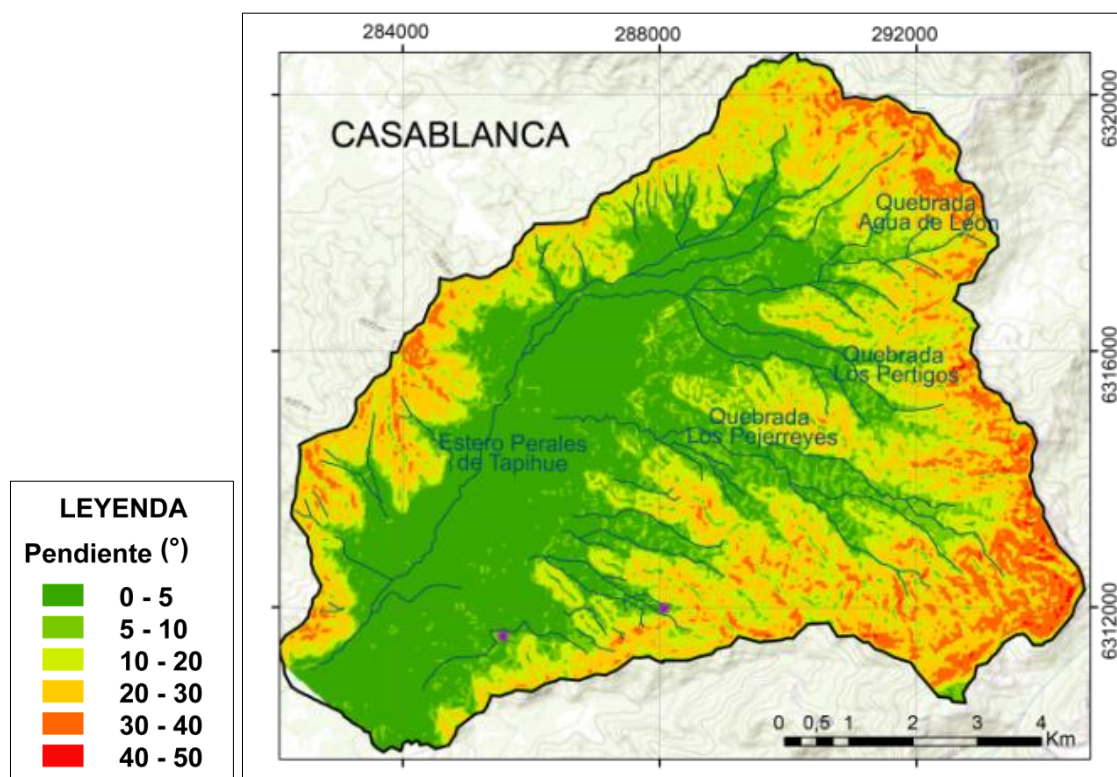


Figura 3.2. Pendientes y red de drenaje de la microcuenca en estudio en el sector de Casablanca. Imagen modificada de López (2018).

El drenaje principal de la cuenca corresponde al estero Los Perales, que posee un caudal temporal, limitado a las precipitaciones invernales y con una dirección de flujo de NE a SW. Las quebradas de segundo y tercer orden muestran un drenaje de tipo dendrítico. El régimen hidrográfico en la cuenca es esporádico, con alimentación pluvial (López 2018).

El valle del estero Los Perales tiene una amplitud de 2 a 3 km, es geomorfológicamente de origen fluvial (López 2018), aunque Lagos (2015) indica que la sección SW de este valle, podría corresponder a terrazas formadas por abrasión marina (Gana *et al.* 1996). El relleno del valle y del piedemonte asociado a las quebradas mayores, está conformado por materiales provenientes de los cerros circundantes, que se originan por medio de procesos de erosión del cordón montañoso granítico y el consiguiente transporte y depositación de los sedimentos (Lagos 2015). En el piedemonte y el valle las pendientes varían de 0 a 20° (Fig. 3.2).

### 3.2.2 GEOLOGÍA LOCAL (1:20.000) DE CASABLANCA

La geología del área comprende principalmente granitoides de edad Jurásico Superior datados en  $158 \pm 1$  Ma, con edades en un intervalo de 150-165 Ma (Gana *et al.* 1996). Estas rocas son el registro de la raíz del arco magmático que se localizó, en esta época, en la actual Cordillera de la Costa (Charrier *et al.* 2007; Mpodozis & Ramos 1989). Estos granitoides se reconocieron en el área como Unidad Los Perales (Jmt) la cual se compone de las subunidades Granodioritas (Jmt-a) y Tonalitas (Jmt-b). La primera, se emplaza localmente en el sector NE de la zona de estudio (Fig. 3.3) y petrográficamente corresponde a granodioritas de biotita y  $\pm$  hornblenda (Contreras 2017) de grano medio a grueso. La Subunidad Tonalita abarca la mayor parte de los cordones montañosos de la cuenca (Fig. 3.4A) y fue definida petrográficamente como tonalitas de biotita y  $\pm$  hornblenda, de grano medio a grueso (Contreras 2017).

Intruyendo a las rocas de la Unidad Los Perales se encontraron diversos diques (Fig. 3.4B), los cuales son descritos petrográficamente por Contreras (2017) como aplita de turmalina de grano medio a fino. Estos diques se integran en la Unidad Diques Aplíticos (Contreras 2017) y podrían tener una edad Cretácico Inferior (Wall *et al.* 1996).

En el piedemonte de los cordones montañosos se reconocen Depósitos coluviales (Qc) que corresponden a sedimentos no consolidados a semiconsolidados, matriz soportados, de mala selección, con granulometría que varía de bloques angulosos a semiangulosos hasta partículas tamaño arcilla (Lagos 2015). También se reconocen Depósitos de remoción en masa (Qrm), los cuales se caracterizan por poseer un alto grado de consolidación, mala selección, con bloques angulosos a semiangulosos a arcillas, de textura matriz soportada. Estos depósitos se ubican en terrazas alzadas 2 a 15 m, por sobre el nivel fluvial actual (Fig. 3.4C).

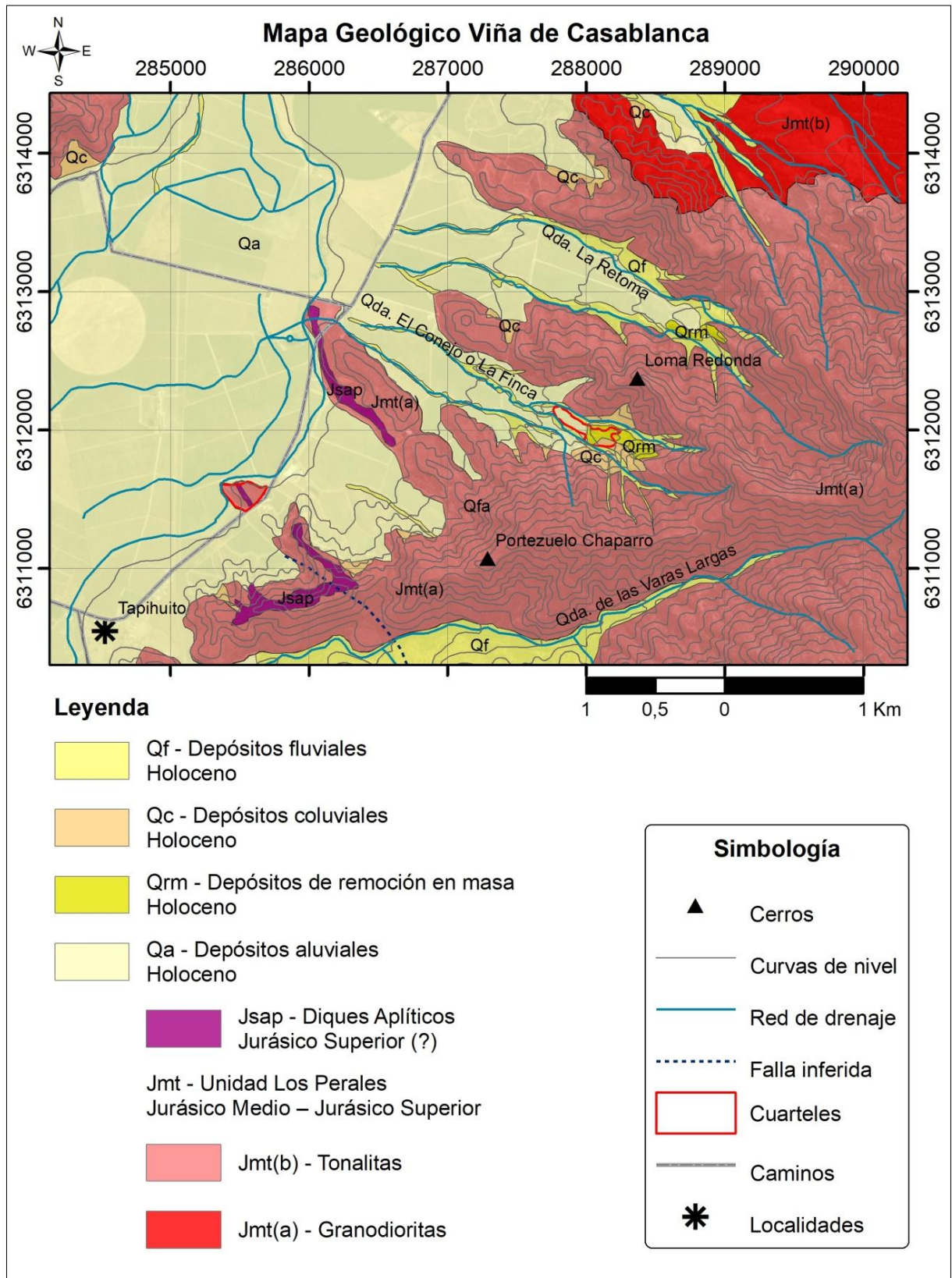


Figura 3.3. Mapa geológico del entorno de la Viña de Casablanca. Modificado de Contreras (2017).



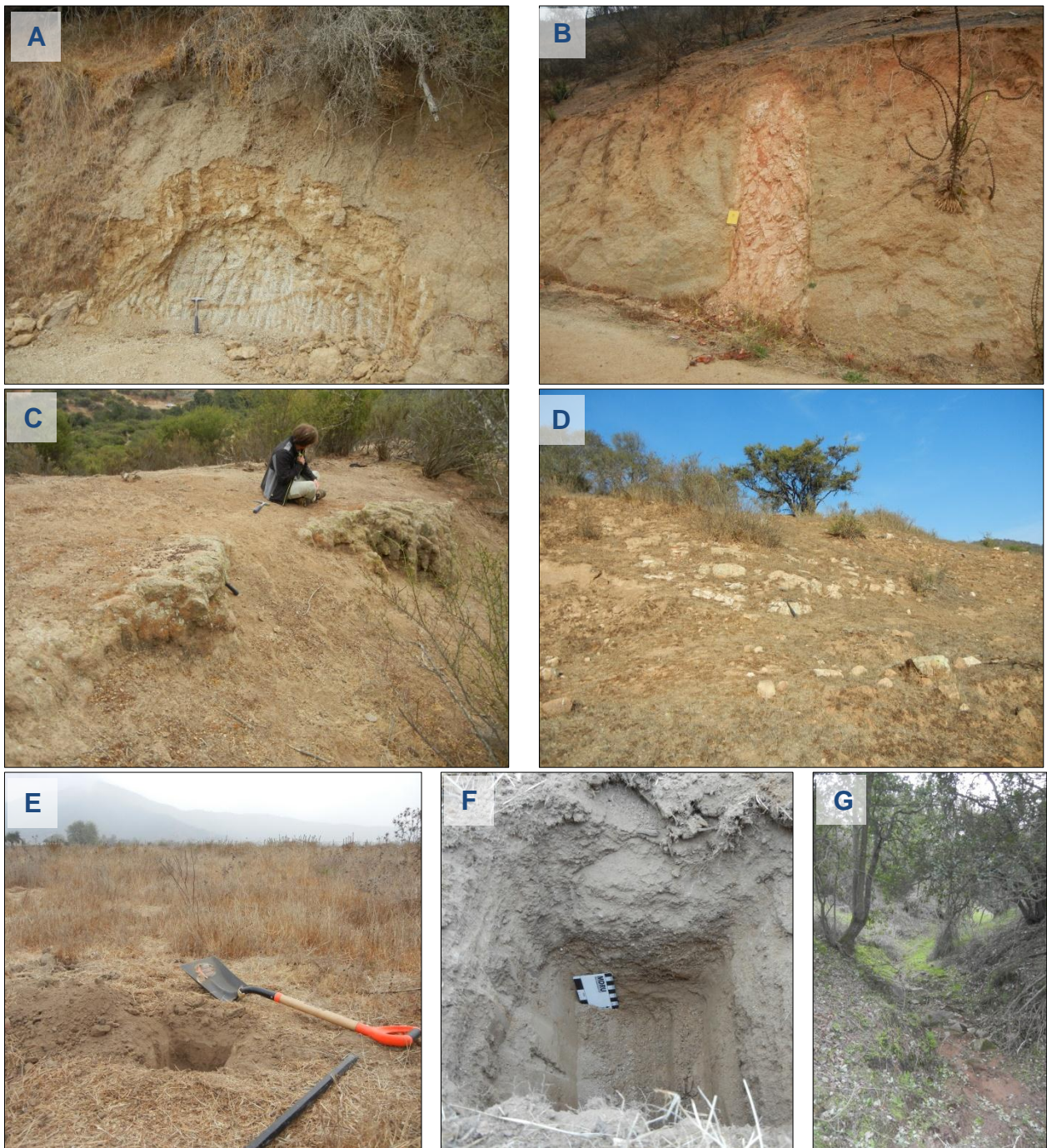


Figura 3.4 Fotografías de las unidades litológicas de Casablanca (A) Corte de camino, Subunidad Tonalita. (B) Dique aplítico intruyendo a tonalita. (C) Depósito de remoción en masa, altamente consolidado. (D) Depósito coluvial en ladera. (E) Depósito aluvial en zona llana. (F) Detalle Depósito aluvial en hoyo de 40 cm. (G) Depósitos fluviales en quebrada de régimen esporádico.

En los valles se reconocen Depósitos aluviales (Qa), caracterizados por sedimentos no consolidados a semiconsolidados, compuestos por gravas, arenas y limos (Lagos 2015), con cierto grado de estratificación (Figs. 3.4E y 3.4F). Finalmente, asociados a quebradas abandonadas y activas, se tienen Depósitos fluviales (Qf), no consolidados, de mala selección



compuesto mayoritariamente por bloques, gravas, arenas redondeadas a semiredondeadas (Fig. 3.4G).

### 3.2.3 CLIMA DE CASABLANCA

En el área se reconoce un clima mediterráneo semiárido con fuerte influencia marina. El promedio de precipitaciones anuales es 450 mm, las que ocurren principalmente en invierno. La temperatura es moderada por las neblinas matinales con una media anual de 13,6°C (Nahrwold 2014).

El régimen de precipitaciones en los últimos 20 años tiene un promedio de 402 mm, con un valor máximo de más de 900 mm en el año 1997 dado por la influencia del Fenómeno del Niño (López 2018), con un mínimo inferior a 100 mm en el año siguiente (1998). Esta misma autora reconoce una disminución en los valores medios de precipitaciones anuales, durante los últimos 8 años.

Durante los dos años de medición en la viña de Casablanca, entre enero de 2014 y enero de 2016 (Fig. 3.5), las condiciones de precipitaciones y temperatura promedio corresponden a un total de 345 mm y 12,6°C en el año 2014 y de 333 mm y 13,5°C en 2015 (Tabla 3.1).

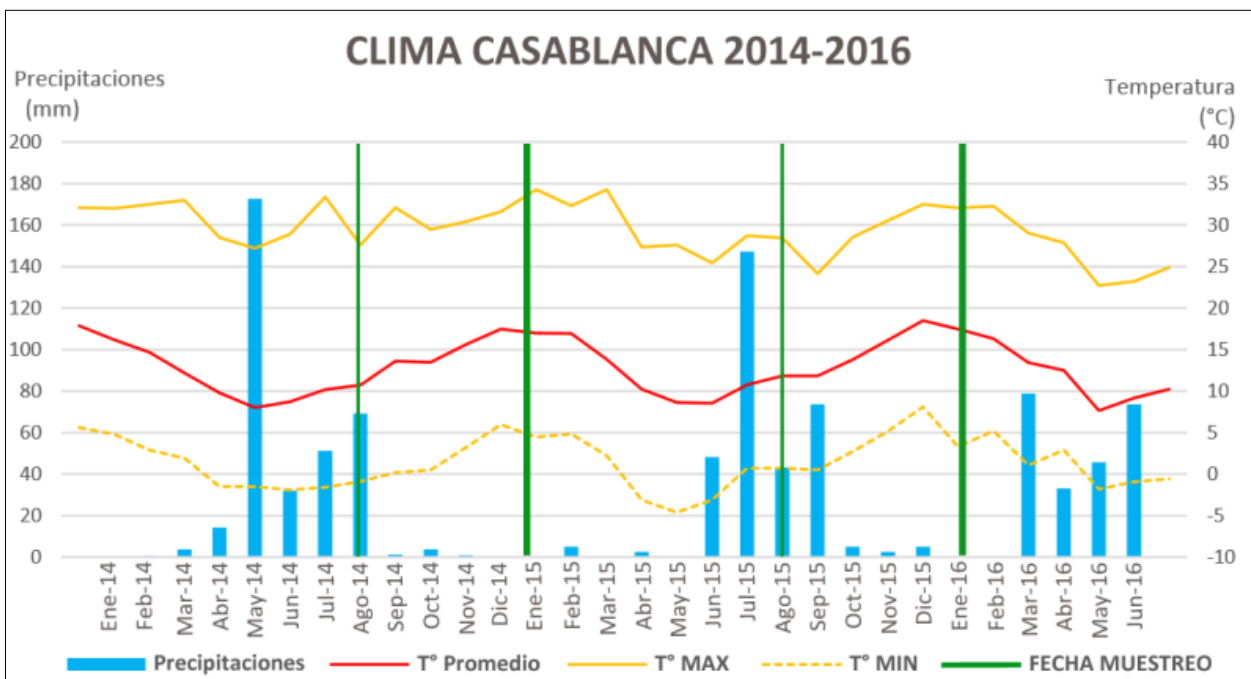


Figura 3.5. Gráfico con precipitaciones y temperatura entre los meses enero de 2014 y junio de 2016 en el área de Casablanca. Datos obtenidos desde la estación Tapihue en la Red Meteovid de Vinos de Chile. Imagen modificada de López (2018).

Tabla 3.1. Precipitaciones totales y valores promedio de temperatura media, mínima y máxima en los años 2014 y 2015 y en los meses previos a las temporadas de medición en la viña de Casablanca.

Año/ Temporada	Período	Precipitaciones totales (mm)	Temperatura media (°C)	Promedio T° mínimas (°C)	Promedio T° máximas (°C)
<b>2014</b>	Ene - Dic 2014	345	12,6	1,0	30,6
<b>2015</b>	Ene - Dic 2015	333	13,5	1,7	29,7
<b>Invierno 2014</b>	May - Ago 2014	272	9,2	-1,6	29,5
<b>Verano 2015</b>	Oct 14 – Ene 15	3	15,1	2,5	30,9
<b>Invierno 2015</b>	May - Ago 2015	198	9,9	-1,6	27,6
<b>Verano 2016</b>	Oct 15 – Ene 16	13	16,5	4,8	30,9

Los valores medios de temperatura y la suma de las precipitaciones ocurridas durante el mes de medición y los tres meses anteriores, en las cuatro temporadas de estudio en la viña de Casablanca, pueden observarse en la tabla 3.1. A partir de esta información se determina que la temporada de Invierno 2014 es más lluviosa y con temperaturas medias levemente menores que la temporada invierno 2015, mientras que en Verano 2016 se tienen mayores temperaturas medias y temperaturas mínimas y 10 mm más de precipitaciones totales, que en Verano 2015.

### 3.2.4 HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DE CASABLANCA

En Casablanca se definen tres unidades hidrogeológicas, la Unidad de roca, de baja permeabilidad y que constituye el límite del acuífero, la Unidad de piedemonte, que corresponde a los depósitos ubicados en los valles secundarios y que actúan como agente de recarga y la Unidad aluvial, unidad de alta permeabilidad que alberga el acuífero (López 2018).

Las mediciones del nivel freático indican que la profundidad de las aguas subterráneas en la cuenca varía en promedio desde 19 m en invierno de 2015 a 26 m en verano de 2016 (López 2018), observando además que entre las dos temporadas de medición ocurre un cambio en la dirección de flujo (Tabla 3.2). Ambos aspectos se explican por la mayor extracción de agua subterránea para el regadío durante la estación de verano (López 2018), lo cual también fue descrito para esta cuenca en DGA (2015).

Tabla 3.2. Piezometría y dirección de flujo de las aguas subterráneas de Casablanca (López 2018).

	N° mediciones	Media (mbs)	Mín. (mbs)	Máx. (mbs)	Dirección flujo
Invierno 2015	22	19,0	10,0	31,0	Desde NW y N hacia SE
Verano 2016	48	26,0	11,0	43,0	Concéntrico, menor flujo hacia SE

\*mbs: metros bajo superficie.

Según la composición hidrogeoquímica y su determinación en el diagrama de Piper, todas las aguas subterráneas son clasificadas como bicarbonatadas cálcicas o magnésicas (López 2018). La química de las aguas responde mayoritariamente a procesos de interacción de agua-roca, que incluyen la hidrólisis de plagioclasas y minerales máficos como biotitas y anfíboles. Además

se reconoce la influencia antrópica, posiblemente asociado a la aplicación de agroquímicos, en los contenidos de  $Mg^{2+}$ , sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) y nitrato ( $NO_3^-$ ) de las aguas subterráneas, así como en los metales Cr y Zn, que aumentan en la temporada de verano (López 2018).

### 3.2.5 SUELOS DE CASABLANCA

En la microcuenca estudiada, CNR (1981) reconocieron las series de suelo: Casablanca (CSB), Hacienda Santa Rosa de Casablanca (HSR), Lo Vásquez (LVZ), Piedmont Lo Vásquez (PLV) y Tapihue (TAP). Particularmente los cuarteles en estudio corresponden a la Serie Tapihue para el caso del cuartel Piedemonte y a la Serie Lo Vásquez para el cuartel Cerro.

La serie Tapihue es definida como un suelo franco arenoso fino, correspondiente a un Inceptisol, los que se caracterizan por presentar un horizonte B bien definido y que pueden presentar un horizonte superficial oscuro, con alto contenido de materia orgánica. Estos suelos de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR) en superficie y color gris oscuro (10YR) a pardo grisáceo oscuro, en el horizonte C, tiene un origen aluvial, son estratificados, moderadamente profundos (70 a 95 cm), bien drenados y ocupan la posición de abanicos y terrazas aluviales, con materiales de origen de tipo granítico (CIREN 2016).

Por su parte la Serie Lo Vásquez es un suelo franco arcillo arenoso de tipo Alfisol, los que se caracterizan por poseer un horizonte B muy desarrollado, con un alto contenido de arcilla respecto al horizonte A. Estos suelos son derivados de rocas graníticas, de color pardo rojizo oscuro en superficie (matiz 5YR) a rojizo amarillento (5YR) y pardo amarillento oscuro (7.5YR) en la proximidad a la roca, son moderadamente profundos (50 a 100 cm), generalmente bien drenados y se localizan en los cerros de la Cordillera de la Costa (CIREN 2016).

## 3.3 GEOGRAFÍA Y GEOLOGÍA A NIVEL DE CUENCA EN SAN ANTONIO

### 3.3.1 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA DE SAN ANTONIO

La cuenca hidrográfica del área de San Antonio corresponde a la subcuenca del estero El Sauce, desarrollado en el flanco oeste de la Cordillera de la Costa. Esta subcuenca de 109,4 km<sup>2</sup> (Fig. 3.6), forma parte y desemboca en la cuenca hidrográfica del Río Maipo (López 2018), muy cercano a la línea de costa.

La viña estudiada se ubica sobre una terraza de abrasión marina (Gana *et al.* 1996) distante 6 km del mar, la cual se formó por alzamientos que ocurren desde el Pleistoceno, posterior a los 2,7 Ma (Farías 2007; Rodríguez 2008). El nivel de terraza, en que se emplaza la zona de trabajo, presenta alturas que varían de 40 m s.n.m. en las secciones más profundas del estero

el Sauce, con alturas entre 150 a 230 m s.n.m. sobre la terraza. Lagos (2015) correlaciona esta terraza con el tercer nivel de terrazas marinas (T3) descritas por Rodríguez (2008).

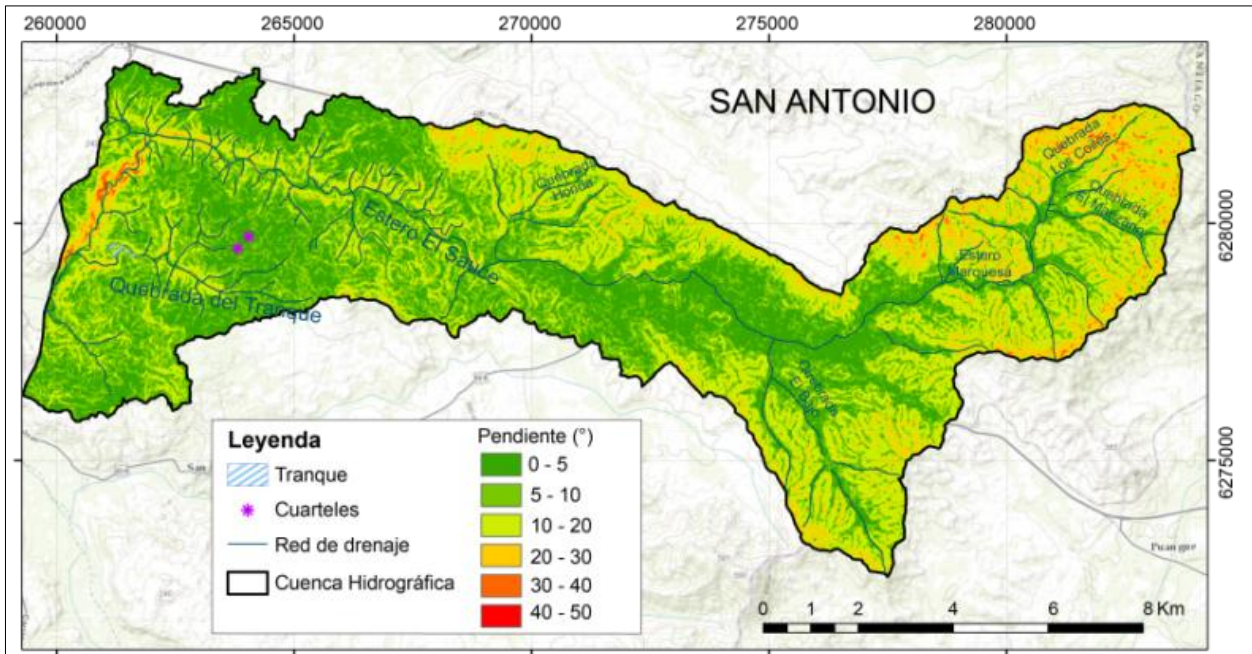


Figura 3.6. Pendientes y red de drenaje de la microcuenca en estudio en el sector de San Antonio. Imagen modificada de López (2018).

La configuración de estas terrazas alzadas, en relación a las áreas de cultivo, indica que éstos se encuentran en una zona en donde predominan los procesos de erosión y de transporte de material hacia puntos de menor pendiente (Lagos 2015). Parte de estos sedimentos son transportados a través de quebradas de corto desarrollo, que se encuentran activamente erosionando esta terraza, las que presentan un régimen de drenaje esporádico asociadas a las épocas de precipitaciones (López 2018). Estas quebradas desembocan en el estero el Sauce, que tiene una dirección de flujo ESE a WNW, en la mayor parte de su curso, pero ésta se quiebra bruscamente en la sección oeste de la cuenca, hacia una dirección NNE a SSW (Fig. 3.6). El régimen de escorrentía de este estero es pluvial, con flujo durante los meses mayo a noviembre (López 2018).

Las pendientes sobre la terraza varían entre 0 a 10° y se acrecientan hasta 30° hacia las laderas norte y sur del estero El Sauce y en las quebradas menores, con pendientes fuertemente escarpadas (hasta 50°) en las laderas este y oeste de la sección N-S del estero El Sauce (Fig. 3.6).

### 3.3.2 GEOLOGÍA LOCAL (1:20.000) DE SAN ANTONIO

La geología está compuesta principalmente por rocas intrusivas del Triásico Superior a Jurásico Inferior, afectadas por un incipiente metamorfismo y por rocas sedimentarias marinas de edad Mioceno-Plioceno (Gana *et al.* 1996).

Contreras (2017) distingue en el área de estudio dos unidades intrusivas: Unidad Dioritas metamorfizadas (Trd) correlacionadas con la unidad Dioritas gneisicas de Cartagena (Gana *et al.* 1996), datada en  $214 \pm 1$  Ma en circones por Gana & Tosdal (1996), las que abarcan mayoritariamente las laderas del valle del estero El Sauce (Fig. 3.7), de nula a baja influencia en los suelos en estudio. La segunda, corresponde a la Unidad San Antonio (TrJg), que se correlaciona con la unidad de sienogranitos y monzogranitos de biotita-anfíbola (Gana *et al.* 1996) con edades de 212 a 180 Ma (SERNAGEOMIN 2004), de amplia distribución en el sector centro y sur del área estudiada (Fig. 3.7), emplazadas en las cotas más altas de la terraza (Fig. 3.8A). Esta unidad se compone por las subunidades Ortogneis (TrJa-a), que petrográficamente fue descrita como un ortogneis tonalítico de biotita (Fig. 3.8B), de grano medio a fino y textura bandeada, y por la subunidad Tonalitas (TrJg-b) compuesta por tonalitas bandeadas de biotita y biotita-hornblenda, de grano medio (Contreras 2017).

Sobre las rocas intrusivas, se reconoce la unidad sedimentaria marina fosilífera Secuencia Malvilla (Msm), correlacionada con las rocas de la Formación Navidad, de edad Mioceno-Plioceno (Gana *et al.* 1996). La unidad está conformada por las subunidades: Areniscas y conglomerados (Msm-a), sobre la cual se forman los suelos en estudio (Fig. 3.7). Estas rocas corresponden a capas de 0,1 a 3,5 m de espesor de areniscas de grano fino a muy grueso y a capas intercaladas de 0,1 a 1 m de conglomerados matriz a clasto soportados (Fig. 3.8C), con imbricación de clastos (en algunos sectores) y gradaciones normales e inversas, de composición polimíctica compuesta por granitoides y gneis, provenientes, mayoritariamente, del basamento intrusivo metamorfozado (Contreras 2017). Por otra parte la subunidad Coquinas (Msm-b), se ubica en un sector muy restringido al SW de la viña en estudio (Fig. 3.7), la cual se describe como una secuencia interestratificada de areniscas y coquinas (Contreras 2017), en que se reconocen conchas de *Ostrea sp.*, entre otros fósiles no identificados (Figs. 3.8D y 3.8E).

Por último, relacionado al estero El Sauce y a quebradas menores desarrolladas sobre las terrazas (Figs. 3.7 y 3.8D), se tienen Depósitos fluviales (Qf) conformados por sedimentos no consolidados, que se componen por proporciones variables de bloques redondeados, gravas, arenas y limos (Contreras 2017).



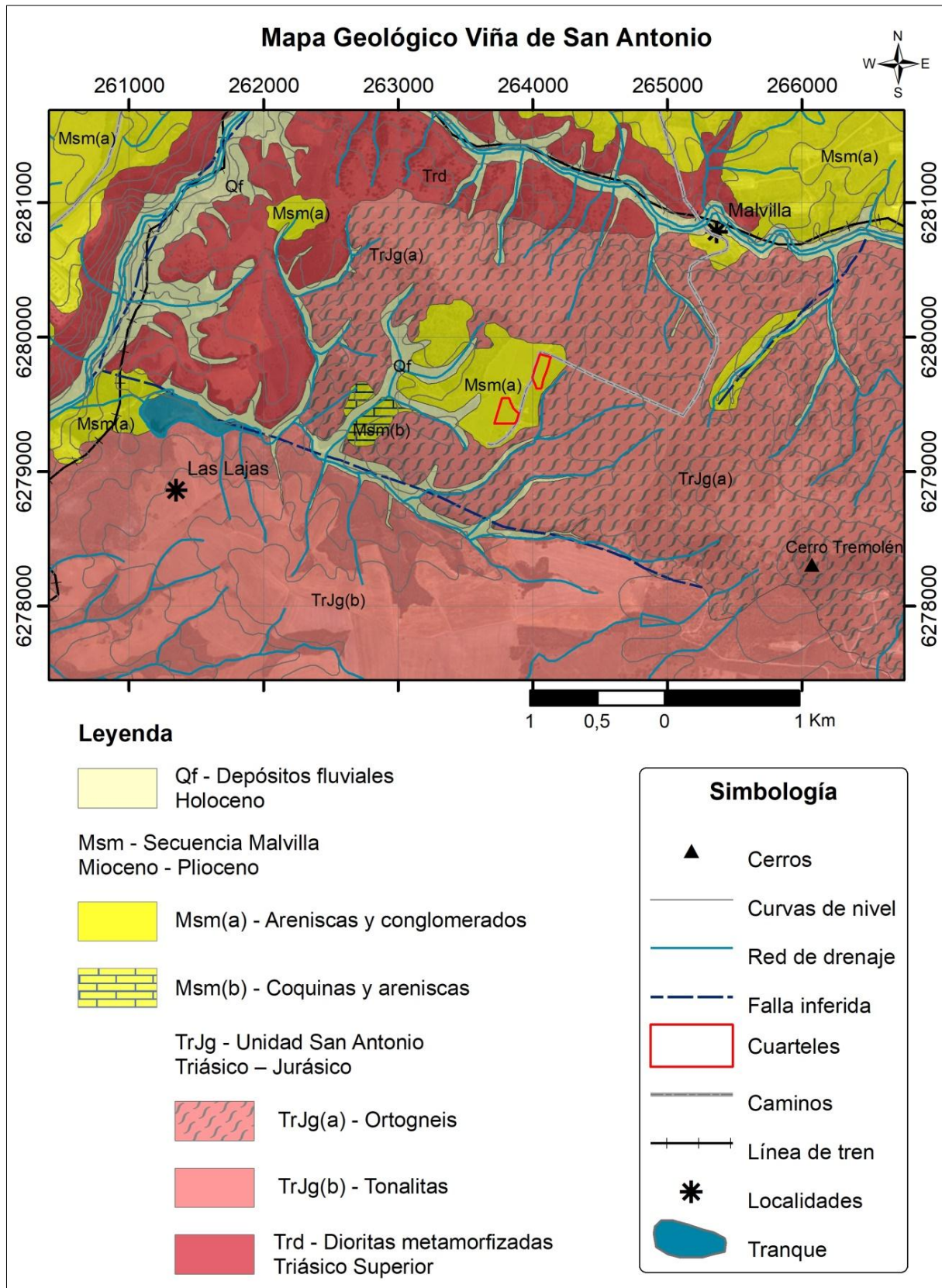


Figura 3.7. Mapa geológico del entorno de la Viña de San Antonio. Modificado de Contreras (2017).



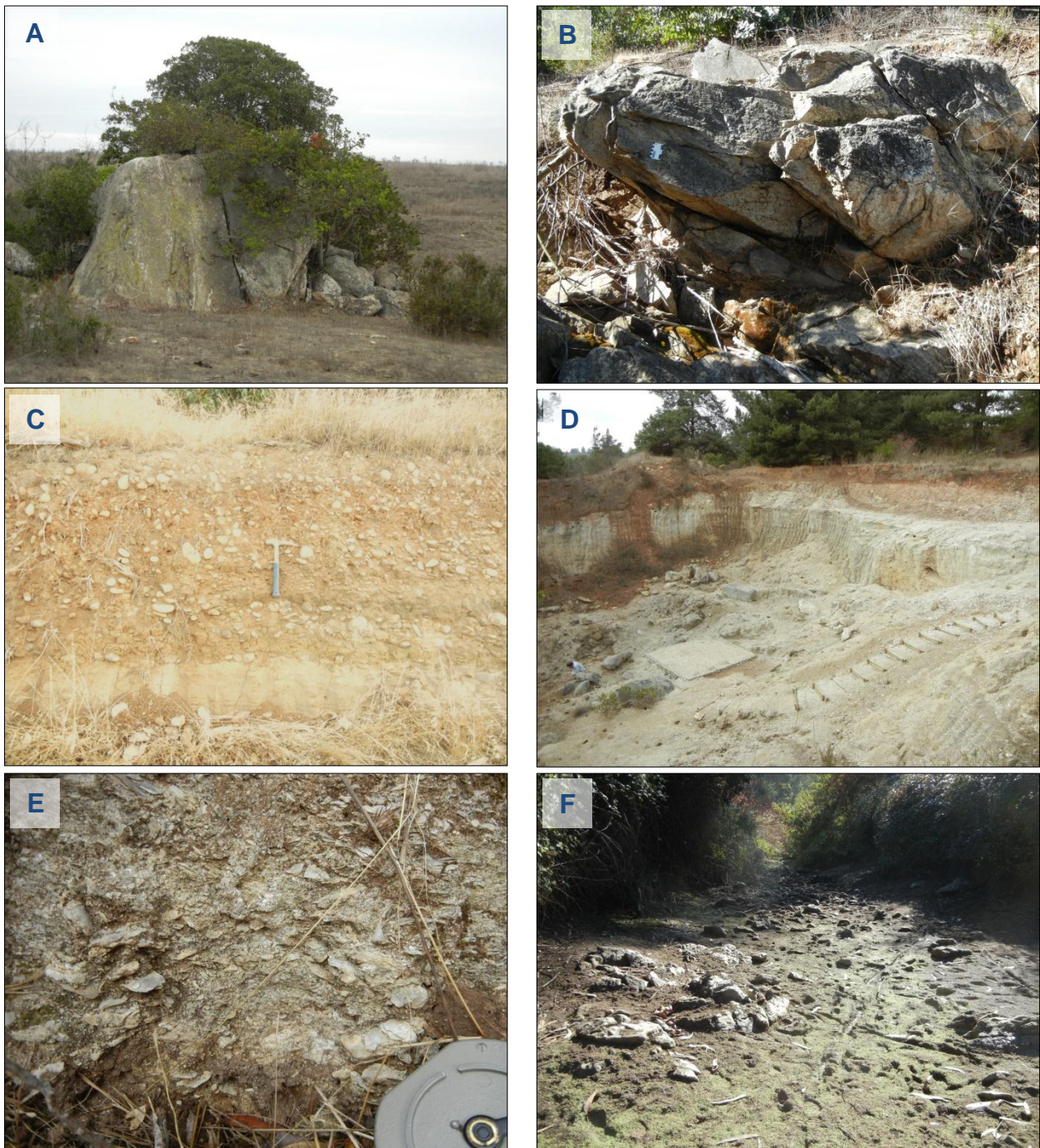


Figura 3.8. Fotografías de las unidades litológicas de San Antonio. (A y B) Afloramientos y/o bloques de rocas intrusivas levemente metamorizadas de la Unidad San Antonio. (C) Unidad Malvilla, secuencia de arenisca sobreyacida por una capa de conglomerado. (D) Banco de coquinas y areniscas de la Unidad Malvilla. (E) Detalle de una capa de coquina en que predominan conchas de ostras. (F) Depósitos fluviales del cauce del estero el Sauce, que presenta régimen de escorrentía esporádico, fotografía indica su estado en el mes de mayo de 2014.



### 3.3.3 CLIMA DE SAN ANTONIO

El clima local es de tipo mediterráneo con influencia costera, con una estación seca de 9 meses de duración. La temperatura promedio anual es de 14,5°C y el promedio de precipitaciones anuales es de 380 mm, las que se concentran en los meses de mayo a julio (Nahrwold 2014).

Un análisis realizado por López (2018) indica que en los últimos 26 años las precipitaciones tuvieron un valor máximo de más de 850 mm durante el año 1997 y un mínimo de menos de 100 mm en el año 1998, al igual que lo determinado para el área de Casablanca. Del mismo modo, las lluvias en los últimos cuatro años, muestran consistentemente valores bajo el promedio que es de 422,2 mm durante este período.

En el período de las mediciones de enero 2014 a enero 2016 (Fig. 3.9), se registraron 361,4 mm de precipitaciones y una temperatura media de 12,8°C en el año 2014 y en el año 2015 las precipitaciones alcanzaron 360,9 mm y la temperatura media fue de 12,9°C (Tabla 3.3).

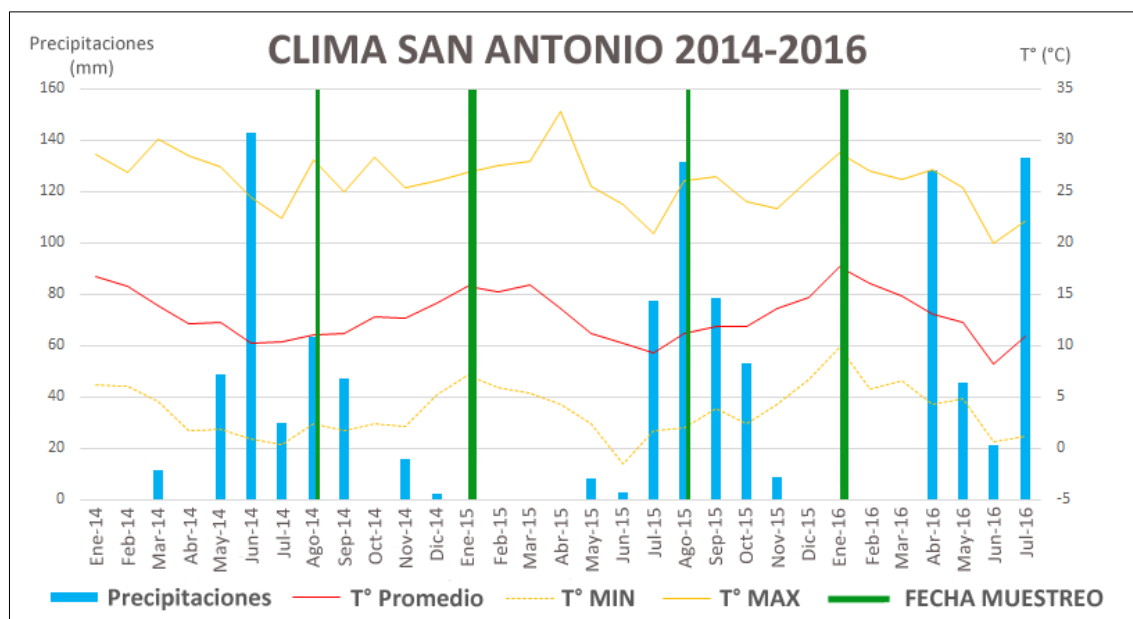


Figura 3.9. Gráfico con precipitaciones y temperatura entre los meses enero de 2014 y julio de 2016 en el área de San Antonio. Datos de temperatura obtenidos desde la estación Ventisquero de Leyda en la Red Meteovid de Vinos de Chile y las precipitaciones desde la estación Cerros de Leyda (DGA). Imagen modificada de López (2018).

Comparativamente, en la temporada de Invierno 2014 (meses mayo a agosto 2014) se midieron mayores temperaturas (medias, mínimas y máximas) y más altas precipitaciones que en la temporada de Invierno 2015 (Tabla 3.3), mientras que en las temporadas de verano se tienen un total de precipitaciones y temperaturas medias y mínimas más elevadas en Verano 2016 (octubre 2015 a enero 2016) que en Verano 2015 (octubre 2014 a enero 2015).

Tabla 3.3. Precipitaciones totales y valores promedio de temperatura media, mínima y máxima en los años 2014 y 2015 y en los meses previos a las temporadas de medición en la viña de San Antonio.

Año/ Temporada	Período	Precipitaciones totales (mm)	Temperatura media (°C)	Promedio T° mínimas (°C)	Promedio T° máximas (°C)
<b>2014</b>	Ene - Dic 2014	361,4	12,8	3,0	26,8
<b>2015</b>	Ene - Dic 2015	360,9	12,9	3,7	25,9
<b>Invierno 2014</b>	May - Ago 2014	284,8	11,0	1,4	25,6
<b>Verano 2015</b>	Oct 14 - Ene 15	17,8	13,9	4,2	26,6
<b>Invierno 2015</b>	May - Ago 2015	220,4	10,5	1,1	24,0
<b>Verano 2016</b>	Oct 15 - Ene 16	62,0	14,4	5,8	25,6

### 3.3.4 HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DE SAN ANTONIO

Las tres unidades hidrogeológicas definidas en San Antonio por López (2018) corresponden a la Unidad de roca compuesta por el basamento intrusivo metamorfozado que presenta deformación milonítica y cataclástica. Si bien esta unidad es el límite inferior del acuífero, posee un bajo a regular potencial hidrogeológico, puesto que puede hospedar algo de agua en las zonas en que la roca se encuentra fracturada. Por otra parte, la Unidad Navidad, conformada por las rocas de la formación homónima, tiene una alta permeabilidad y es una de las unidades en que se aloja el acuífero. La tercera es la Unidad coluvial-fluvial y agrupa a los depósitos semiconsolidados a no consolidados del área, los cuales presentan una alta permeabilidad y también alojan al acuífero, principalmente en los sectores de topografía baja (López 2018).

En base a la descripción de pozos de la Dirección General de Aguas, se determina que en esta subcuenca existen dos acuíferos, uno hospedado en la Unidad Navidad y en la Unidad de roca y el segundo alojado en la Unidad coluvial (López 2018).

La medición de los niveles freáticos en las temporadas Invierno 2015 y Verano 2016, muestran que los acuíferos son bastantes someros, con profundidades mínimas de 0,1 mbs (metros bajo superficie) en invierno y de 1 m en verano. En verano hay una evidente profundización del acuífero con valores medios de 5,1 mbs y un valor máximo de 25,2 mbs (Tabla 3.4). La dirección de flujo en ambas estaciones va desde las zonas altas de la terraza hacia las quebradas y desde éstas hacia el estero El Sauce (López 2018).

Tabla 3.4. Piezometría y dirección de flujo de las aguas subterráneas de San Antonio (López 2018).

	N° mediciones	Media (mbs)	Mín. (mbs)	Máx. (mbs)	Dirección flujo
Invierno 2015	10	2,6	0,1	4,5	Desde la terraza hacia quebradas y estero El Sauce
Verano 2016	25	5,1	1,0	25,2	

\*mbs: metros bajo superficie.

Según la composición del agua y su determinación en el diagrama de Piper, tres muestras de agua subterránea se clasifican como cloruradas cálcicas y sódicas y cuatro muestras como bicarbonatadas cálcicas y sódicas (López 2018). La química de las aguas presenta concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  que se explicarían por la disolución de halita, que puede estar presente en ambientes cercanos a la costa, y la meteorización de silicatos, además los contenidos de  $\text{Mg}^{2+}$  pueden provenir de la meteorización de aluminosilicatos y del uso de agroquímicos (López 2018).

### 3.3.5 SUELOS DE SAN ANTONIO

Los suelos en el área de estudio corresponden a la Serie Bochinche (BOC) y son clasificados como Molisol (CIREN, 1997a). Este suelo tiene una textura superficial franco arenosa y texturas franco arcillo arenosa a arcillo arenosa en profundidad. Son suelos moderadamente profundos, que varían entre 40 a 80 cm de profundidad efectiva. El color es descrito como pardo oscuro (matiz 7.5YR) en superficie, a colores pardo rojizo oscuro y rojo amarillento (matiz 5YR) en profundidad. Se forman sobre un sustrato de origen sedimentario, en que se reconoce una capa de gravas redondeadas, además en profundidad y en los quiebres de pendiente se observa que este suelo descansa sobre rocas graníticas. Estos suelos se ubican en una terraza litoral, con topografía ligeramente ondulada y pendientes entre 2 a 50%, ésta última categoría es reconocida en zonas de quebradas (CIREN 1997a).

## 3.4 GEOGRAFÍA Y GEOLOGÍA A NIVEL DE CUENCA EN SANTA CRUZ

### 3.4.1 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA DE SANTA CRUZ

La cuenca hidrográfica de la zona de Santa Cruz, es una subcuenca de 54 km<sup>2</sup> asociada a la cuenca hidrográfica mayor del río Tinguiririca (López 2018); esta subcuenca se desarrolla en la Cordillera de la Costa y se encuentra limitada hacia el norte, oeste y este por los cerros del cordón montañoso Tagua-Tagua y hacia el sur por el valle del río Tinguiririca (Fig. 3.10).

Las alturas del cordón montañoso tienen sus puntos más elevados en el sector NE del área, con 940 m s.n.m. y en el Cerro La Hoya de 674 m s.n.m. al oeste del cordón (Figura 3.11). Las laderas son altamente escarpadas con pendientes de 20 a 58° (López 2018), las cuales se encuentran disectadas por quebradas esporádicas, activas durante la época pluvial (Contreras 2017). En las laderas de los cerros se reconocen depósitos de piedemonte, caracterizados como depósitos coluviales y un abanico aluvial de dimensión considerable, los cuales se encuentran en pendientes 5 a 20°. En la zona de baja pendiente (0-5°) se reconoce una llanura

de inundación y una terraza fluvial antigua del río Tinguiririca, las cuales se ubican en alturas que van desde 200 a 185 m s.n.m.

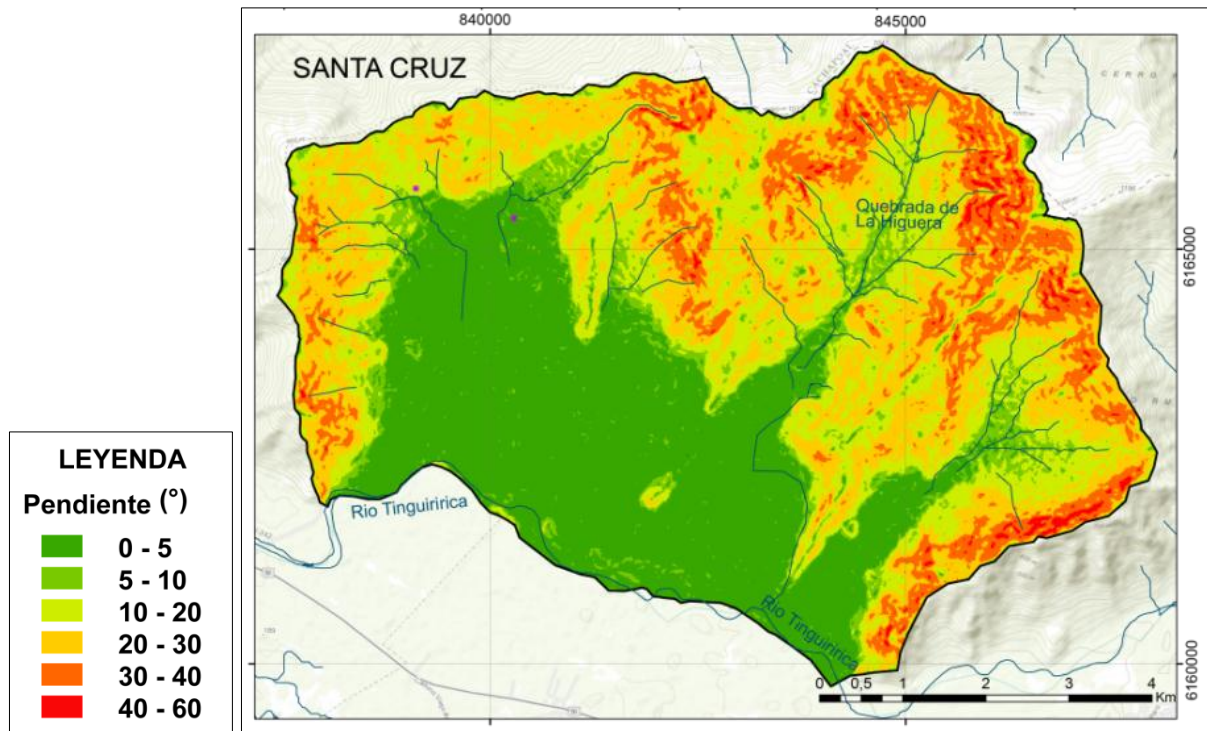


Figura 3.10. Pendientes y red de drenaje de la microcuenca en estudio en el sector de Santa Cruz. Imagen modificada de López (2018).

El río Tinguiririca nace en el glaciar Universidad ubicado al oriente del volcán homónimo en la Cordillera de los Andes y desemboca en el río Rapel, tiene un régimen mixto, nival y pluvial, de características perennes (Guzmán *et al.* 2016) y presenta en esta sección una forma meándrica en un cauce de ancho que varía entre 80 a de 350 m, en donde se reconocen depósitos fluviales activos.

### 3.4.2 GEOLOGÍA LOCAL (1:20.000) DE SANTA CRUZ

La geología del área presenta mayoritariamente rocas intrusivas graníticas del Cretácico Inferior a Cretácico Superior (123 a 85 Ma), que afloran en la Cordillera de la Costa entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos (SERNAGEOMIN 2004). En el área de estudio estas rocas se denominan Unidad Apalta (Kit) y se conforma por dos subunidades: Subunidad Granodiorita (Kit-a), de amplia distribución en el área de estudio, principalmente en el cordón montañoso norte (Figs. 3.11 y 3.12A), descrita petrográficamente como granodioritas de hornblenda y biotita de grano medio (Contreras 2017). La segunda corresponde a la Subunidad Tonalita (Kit-b), que se ubica localmente al oeste del área (Figs. 3.11 y 3.12B) y se compone por tonalitas de biotita y hornblenda de grano grueso, fuertemente alteradas a arcilla (Contreras 2017).



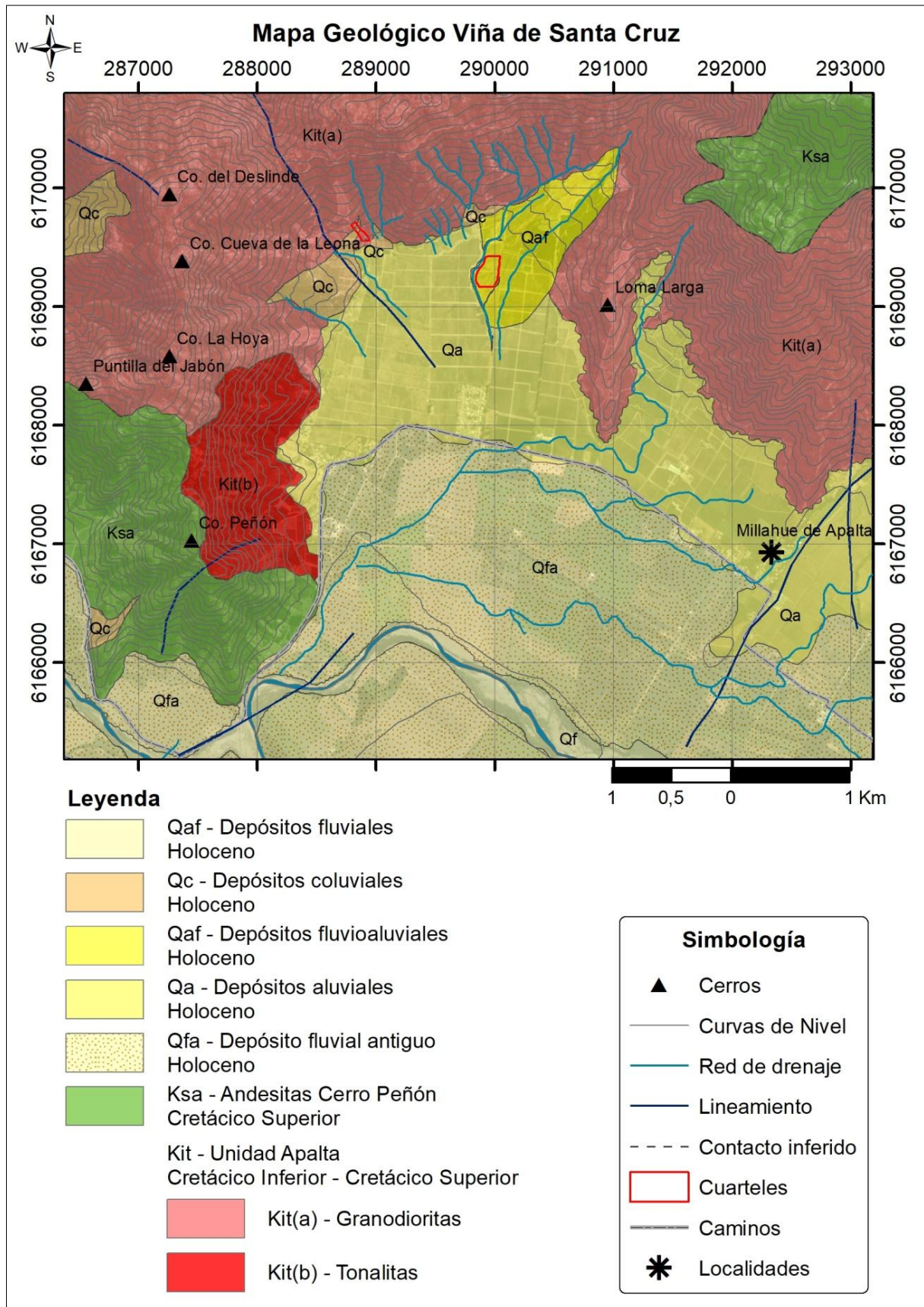


Figura 3.11. Mapa geológico del entorno de la Viña de Santa Cruz. Modificado de Contreras (2017).



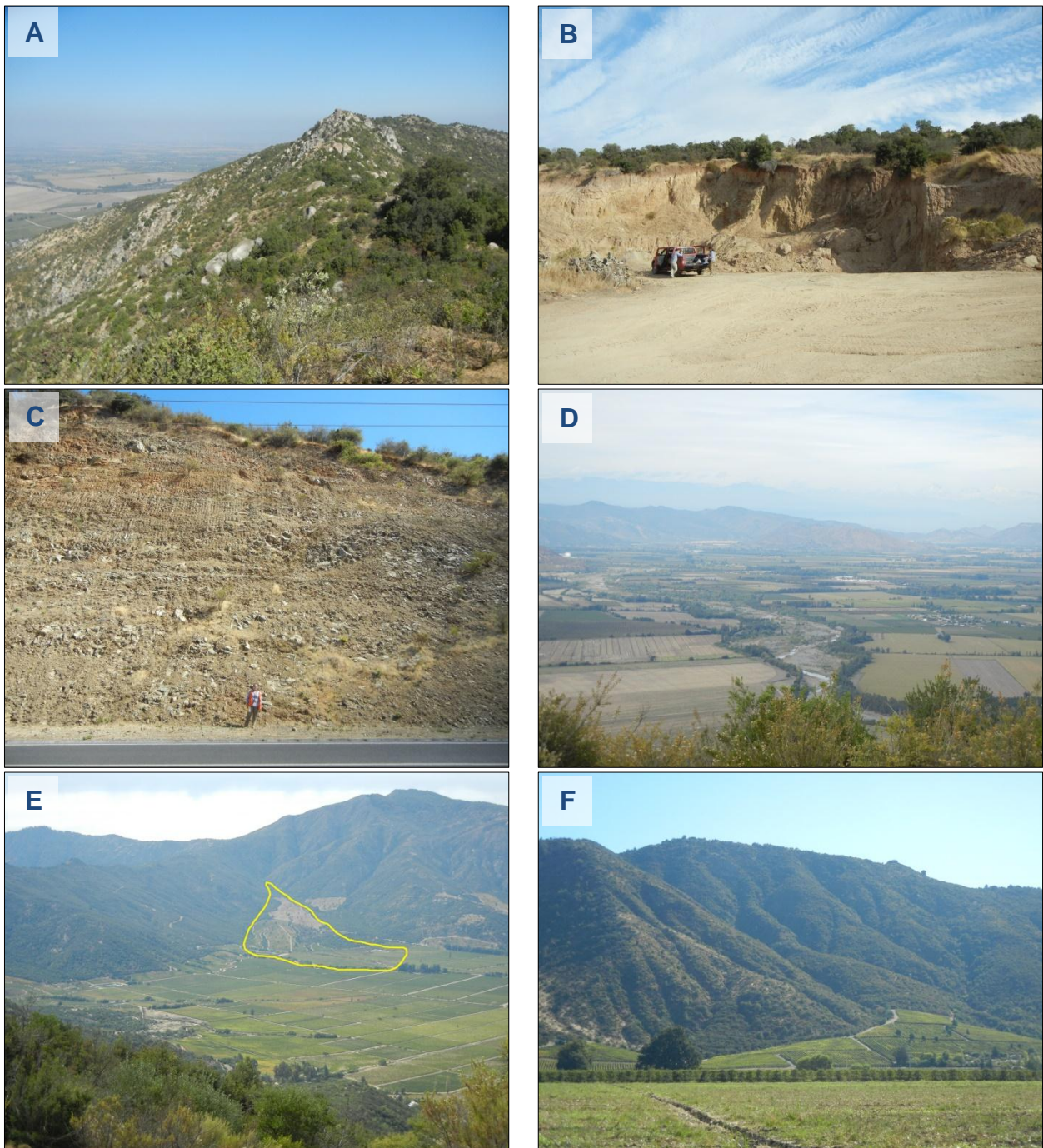


Figura 3.12. Fotografías de las unidades litológicas de Santa Cruz. (A) Cordón Tagua-Tagua afloramientos y bloques de Subunidad Granodioritas. (B) Cantera en donde se extraen rocas de la Subunidad Tonalitas. (C) Corte de camino en que se exponen rocas volcánicas de la Unidad Andesitas Cerro Peñón. (D) Valle del río Tinguiririca se reconocen las unidades Depósitos fluviales antiguos y Depósitos fluviales. (E) Llanura de inundación colmatada por Depósitos aluviales y en contorno amarillo Unidad de Depósitos fluvioaluviales. (F) Depósitos coluviales en piedemonte de cordón montañoso.

Sobre las rocas intrusivas de la Unidad Apalta se disponen rocas volcánicas que se correlacionan con la Formación Lo Valle, la cual ha sido datada en el Cretácico Superior (Hauser 1995). En el área de estudio esta unidad ha sido denominada como Andesitas Cerro Peñón (Ksa), las que se distribuyen en dos afloramientos principales, uno reconocido en las

inmediaciones del Cerro Peñón (Figs. 3.11 y 3.12C), en donde las rocas son clasificadas petrográficamente como andesitas de biotita y andesitas de hornblenda (Contreras 2017); el segundo afloramiento, ubicado en el sector NE del área, no es mapeado en terreno, por lo tanto, su locación se interpreta mediante imágenes satelitales, en base a la información contenida en Godoy *et al.* (2006).

Por último, se reconocen las unidades geológicas del Holoceno (Contreras 2017), entre los que se tienen a los Depósitos fluviales antiguos (Qfa), que como ya fue mencionado, son los sedimentos semiconsolidados que forman parte de una terraza antigua del río Tinguiririca y su distribución sigue la forma meándrica del río (Figs. 3.11 y 3.12D); Depósitos aluviales (Qa) que corresponden a sedimentos semiconsolidados que se encuentran rellenando la cuenca; Depósitos fluvioaluviales (Qaf) que se disponen asociados a un abanico aluvial (Figs. 3.11 y 3.12E) compuesto principalmente por sedimentos de grano fino, con paleocanales que presentan clastos angulosos y disectado actualmente por quebradas activas; Depósitos coluviales (Qc), de origen gravitacional conformados por sedimentos semiconsolidados de tamaños variables, con bloques de hasta 4 m a partículas tamaño arcilla, ubicados en zonas de piedemonte (Figura 3.12 F) y, finalmente, Depósitos fluviales (Qf) que corresponden a sedimentos actuales no consolidados, localizados en el cauce del río Tinguiririca (Fig. 3.12D) y en quebradas menores.

### 3.4.3 CLIMA DE SANTA CRUZ

El clima local se caracteriza por ser del tipo mediterráneo subhúmedo con veranos secos y calurosos con una temperatura media anual de 14,7°C e inviernos moderadamente lluviosos, con una precipitación anual de 684 mm (Nahrwold 2014).

En los últimos 26 años se ha registrado un promedio de precipitaciones de 670 mm, con un máximo de 1150 mm en el año 2002 y un mínimo de 186 mm el año 1998, observándose una clara disminución de las precipitaciones anuales desde el año 2009 a la fecha (López 2018).

En los dos años de estudio en la viña de Santa Cruz (Fig. 3.13) se registran un total de 791,2 mm de precipitaciones, con una temperatura media de 15,1°C durante el año 2014 y menores precipitaciones totales (607,1 mm) aunque mayores temperaturas medias (15,7°C) en el año 2015 (Tabla 3.5).

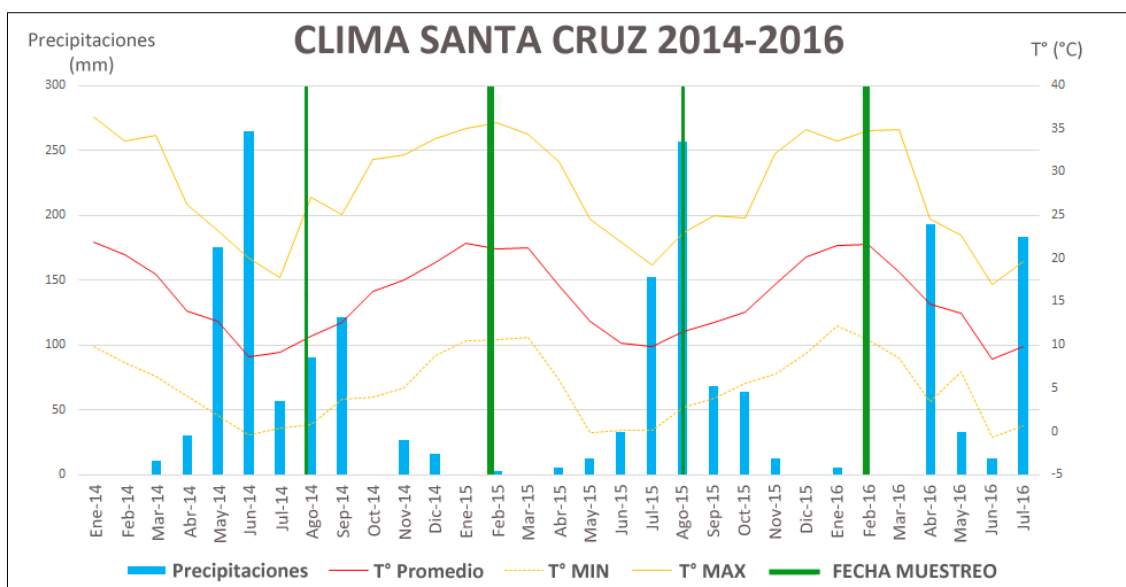


Figura 3.13. Gráfico con precipitaciones y temperatura entre los meses enero de 2014 y diciembre de 2016 en el área de Santa Cruz. Datos de precipitaciones (enero a abril de 2014) desde estación Millahué de DGA. Desde la Red Meteovid de Vinos de Chile se obtienen datos de precipitaciones (mayo a diciembre de 2014) de la estación Santa Cruz y datos de temperatura (todo el período) y precipitaciones (enero 2015 a julio 2016) de la estación Ventisquero de Apalta. Imagen modificada de López (2018).

Considerando el mes de medición y los tres meses anteriores, se reconoce que la temporada Invierno 2014 es más lluviosa y con temperaturas medias y máximas levemente inferiores que la temporada de Invierno 2015 (Tabla 3.5). Por su parte, en la temporada de Verano 2016 se registran casi el doble de precipitaciones totales que en Verano 2015, pero con temperaturas medias y máximas mayores.

Tabla 3.5. Precipitaciones totales y valores promedio de temperatura media, mínima y máxima en los años 2014 y 2015 y en los meses previos a las temporadas de medición en la viña de Santa Cruz.

Año/ Temporada	Período	Precipitaciones totales (mm)	Temperatura media (°C)	Promedio T° mínimas (°C)	Promedio T° máximas (°C)
<b>2014</b>	Ene - Dic 2014	791,2	15,1	4,4	28,4
<b>2015</b>	Ene - Dic 2015	607,1	15,7	5,5	28,5
<b>Invierno 2014</b>	May - Ago 2014	586,6	10,4	0,7	22,0
<b>Verano 2015</b>	Oct 14 - Ene 15	42,2	18,7	7,1	33,0
<b>Invierno 2015</b>	May - Ago 2015	454,7	11,1	0,7	22,2
<b>Verano 2016</b>	Oct 15 - Ene 16	81,3	18,1	8,3	31,3

### 3.4.4 HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DE SANTA CRUZ

En la microcuenca del área de Santa Cruz fueron reconocidas cuatro unidades hidrogeológicas (López 2018). La Unidad de roca posee una baja permeabilidad y es límite inferior del acuífero, mientras que las unidades de alta permeabilidad y que alojan el acuífero corresponden a la Unidad fluvial y a la Unidad aluvial, la primera compuesta por los depósitos actuales y antiguos,

genéticamente relacionados al río Tinguiririca y la segunda formada por depósitos semiconsolidados a no consolidados ubicados entre el cordón Tagua-Tagua y los depósitos fluviales antiguos (Fig. 3.11). Por último la Unidad coluvial ubicada en el piedemonte del cordón montañoso, presenta alta permeabilidad y es de alta relevancia hidrogeológica ya que a través de ellos se recarga el acuífero. A través del análisis de la estratigrafía de los pozos recopilados desde la DGA se determina que el acuífero es libre y tendría un espesor mínimo de 180 m.

Los niveles freáticos que se midieron en la temporada Invierno 2015 y el Verano 2016 se presentan en la tabla 3.6. Los resultados muestran un nivel freático somero con cotas mínimas y máximas de 0,25 y 7 mbs (metros bajo superficie) en invierno y de 1,2 y 50 mbs en la estación de verano. La dirección del flujo subterráneo ocurre desde las zonas altas del cordón montañoso hacia el cauce del río Tinguiririca en ambas temporadas, aunque en verano se reconocen algunos pozos con isolíneas concéntricas producto de una mayor extracción de agua (López 2018). Además la interpretación de las isopiezas realizada por esta autora indica que en la Unidad aluvial el flujo es más rápido que en la Unidad fluvial, lo cual se explica por la cercanía de esta última unidad con el río, el cual probablemente recarga el acuífero.

Tabla 3.6. Piezometría y dirección de flujo de las aguas subterráneas de Santa Cruz (López 2018).

	N° mediciones	Media (mbs)	Mín. (mbs)	Máx. (mbs)	Dirección flujo
Invierno 2015	11	2,2	0,25	7	Desde las montañas hacia el río
Verano 2016	16	8,8	1,2	50	Similar, pero con pozos que muestran conos de depresión

\*mbs: metros bajo superficie.

Según López (2018), las aguas subterráneas de Santa Cruz se clasifican según el diagrama de Piper como aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas sódicas, la química de las aguas se explica principalmente por la meteorización de plagioclasas y anfíboles, sin embargo, la concentración de algunos iones podría responder parcialmente a la infiltración en el acuífero de aguas grises y negras ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  y P), así como a la influencia del uso agroquímicos ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ).

### 3.4.5 SUELOS DE SANTA CRUZ

En base al trabajo de Anativia (1999) se determina que en la microcuenca estudiada en Santa Cruz existen las series de suelo: Cunaco (CUC), Callejones (CJN), Mancumán (MAN) y la asociación de suelos La Lajuela (LAL). Específicamente los suelos de los cuarteles seleccionados de esta viña corresponden a la Serie Mancumán en el cuartel Isla y a la asociación La Lajuela en el cuartel Pendiente.



La Serie Mancumán es un suelo franco arenoso, categorizado como un Entisol, que corresponde a un suelo de limitado desarrollo, proveniente de depósitos aluviales recientes, suelos delgados sobre roca o pendientes, o dunas estabilizadas con escasa acumulación de materia orgánica. La Serie Mancumán fue reconocida en el sector de Apalta y se describe como un suelo de origen coluvial, estatificado y profundo (30 a 130 cm), de colores pardo grisáceo oscuro a pardo oscuro (matiz 10YR), con presencia de gravilla de cuarzo en todo el perfil, con un drenaje que va desde excesivo a imperfecto, con un nivel freático que en invierno puede variar desde 25 a 100 cm de profundidad. Esta serie de suelo se ubica en posición de piedemonte, específicamente en un cono de deyección (CIREN 2010).

Por otra parte, la asociación de suelos La Lajuela, corresponde a suelos franco arcillo arenoso de tipo Alfisol, los que se reconocen por poseer un horizonte B con alto contenido de arcilla, en relación al horizonte A. Estos suelos se encuentran ubicados en cerros con pendientes de 30 a 50%, presentan un color pardo amarillento (10YR) en superficie y colores variados en profundidad, tales como amarillo rojizo y pardo a pardo oscuro. Son suelos moderadamente profundos, bien drenados, desarrollados directamente sobre la roca, descrita como andesita (CIREN 2010).

### **3.5 GEOGRAFÍA Y GEOLOGÍA A NIVEL DE CUENCA EN SAN JAVIER**

#### **3.5.1 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA DE SAN JAVIER**

La microcuenca hidrográfica definida en la zona de San Javier tiene un área de 135 km<sup>2</sup> (López 2018) y, según la clasificación de la DGA, forma parte de la sub-subcuenca del río Loncomilla, entre el río Longaví y el río Putagán. Esta microcuenca se encuentra limitada al norte y oeste por el cordón montañoso más oriental de la Cordillera de la Costa y hacia el este por el cauce del río Loncomilla (Fig. 3.14) a partir del cual se abre paso la Depresión Intermedia.

Las mayores alturas del cordón montañoso varían entre 883 m s.n.m. en el cerro Los Cogúiles y 373 m s.n.m. en el cerro Manantial (Fig. 3.15), las laderas de estos cerros tienen pendientes que van desde 10° a 50° (Fig. 3.14). La zona de llanura presenta una superficie ondulada, con lomajes suaves y algunos cerros islas, con alturas entre 100 a 150 m s.n.m. y pendientes que circundan los 0 y 20°.

Muchas de las quebradas que provienen de los cerros de la Cordillera de la Costa fueron canalizados en la llanura de inundación, algunas han sido cubiertas para el uso de la tierra con fines agrícolas, mientras que los cursos que aún subsisten tienden a presentar formas meándricas y presentan un régimen perenne. Por su parte, el río Loncomilla, que se forma por



la confluencia de los ríos Perquilauquén y Longaví, fluye en esta zona con una dirección sur-norte y su cauce tiene en la zona más ancha cerca de 800 m, con meandros irregulares, en parte anastomosados (Fig. 3.14 y 3.15).

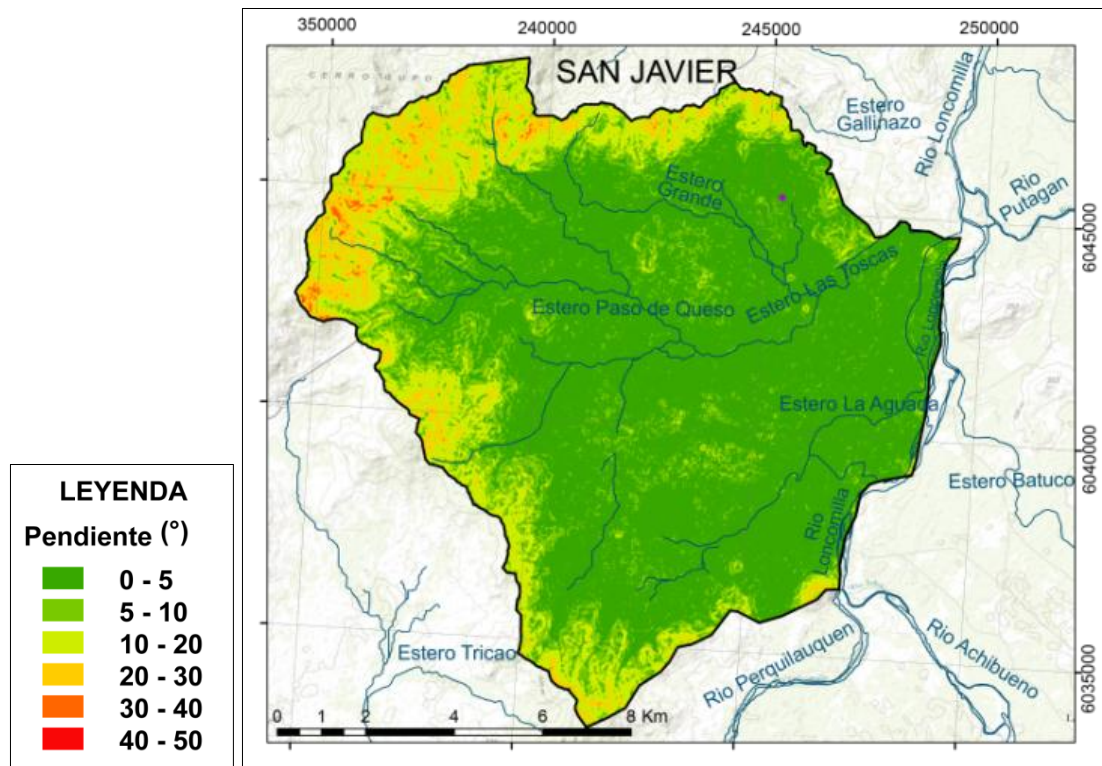


Figura 3.14. Pendientes y red de drenaje de la microcuenca en estudio en el sector de San Javier. Imagen modificada de López (2018).

### 3.5.2 GEOLOGÍA LOCAL (1:20.000) DE SAN JAVIER

Las rocas más antiguas en el área de San Javier corresponden a rocas intrusivas de la Unidad Monzogranito Las Toscas (Jrm), las que se reconocen en algunos cerros islas y en un cerro aledaño al río Loncomilla, al NE del área (Figs. 3.15 y 3.16A), el cual presenta mineralización de cobre; estas rocas corresponden petrográficamente a un monzogranito de hornblenda de grano medio (Contreras 2017) y pueden correlacionarse con los plutones de edad Jurásico Inferior de 202 a 178 Ma (SERNAGEOMIN 2004). Le siguen en antigüedad, las rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Unidad Volcanitas Melozal (Ksv), ampliamente distribuidas en las zonas topográficamente elevadas del área de estudio (Figs. 3.15 y 3.16B); petrográficamente estas rocas fueron descritas por Contreras (2017) como andesitas de anfíbol, andesitas brechosas, tobas de cristales, toba de lapilli vitrocrystalina y tobas líticas, las cuales han sido correlacionadas con las volcanitas de la Formación Lo Valle de edad Cretácico Superior (Hauser 1995).

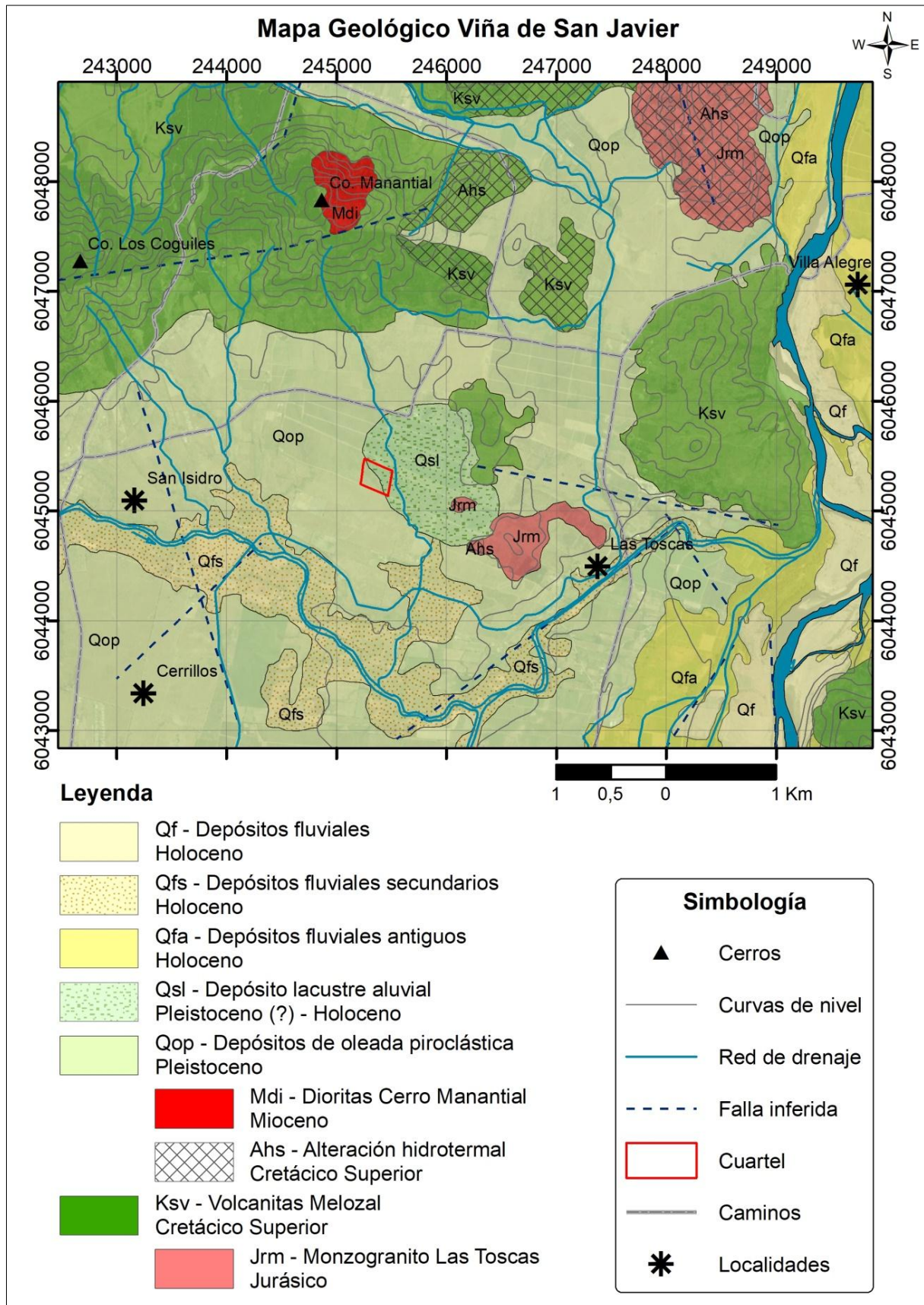


Figura 3.15. Mapa geológico del entorno de la Viña de San Javier. Modificado de Contreras (2017).



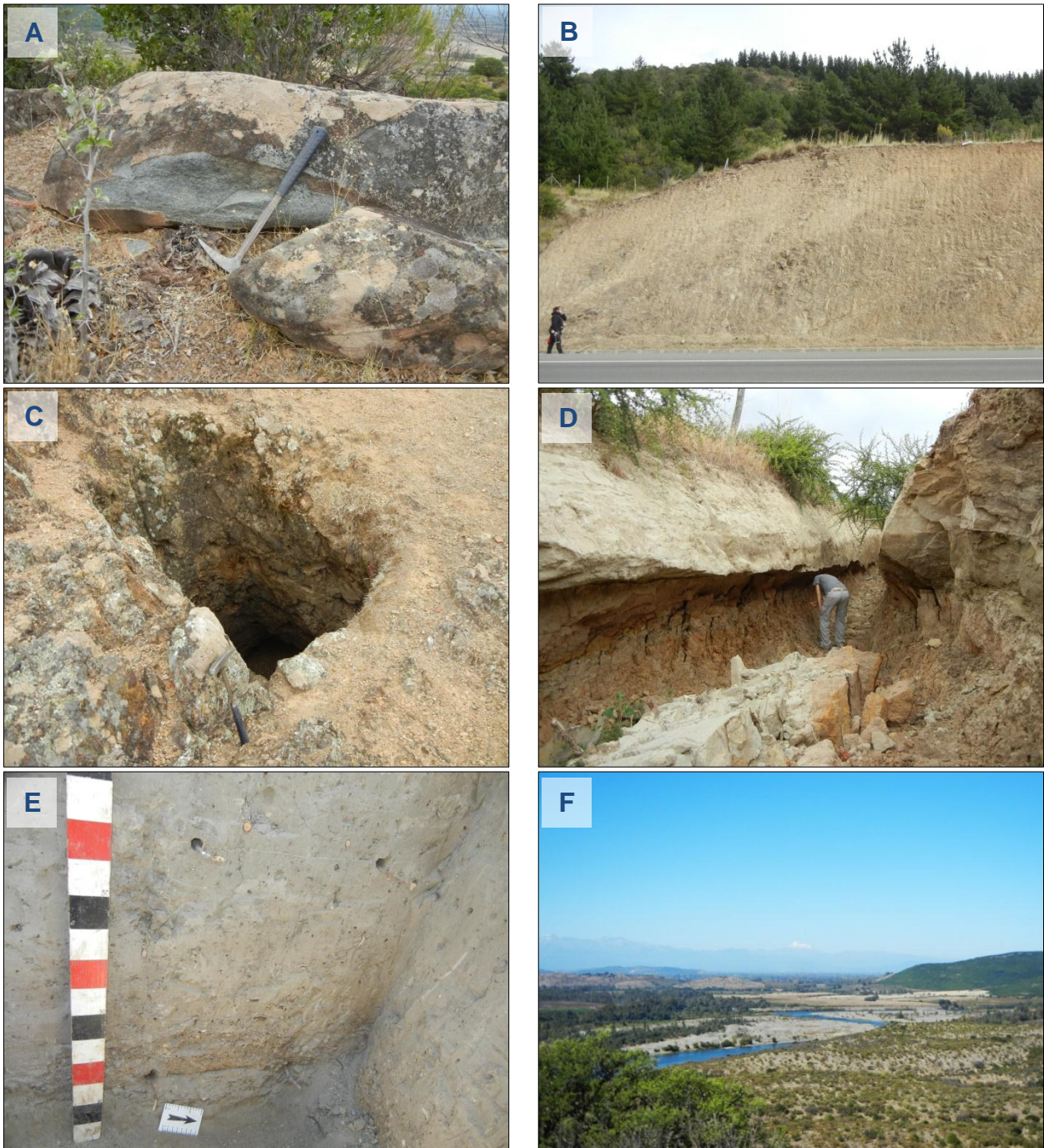


Figura 3.16. Fotografías de las unidades litológicas de San Javier. (A) Bloque asociado a afloramientos de la Unidad Monzogranito Las Toscas; (B) Corte de camino en que se observa las potentes capas de la Unidad Volcanitas Melozal; (C) Pique minero reconocido en el cordón montañoso cercano al Cerro Manantial; (D) Capa de más de 1 m de la toba vítrea de la Unidad Depósitos de oleada piroclástica; (E) Calicata en que se reconocen sedimentos de la Unidad Depósitos lacustre-aluvial sobreyaciendo a capa de toba; (F) Cauce del río Loncomilla y terraza antigua relacionada.

Las unidades antes mencionadas, están afectadas localmente por una fuerte alteración silíceá (Ahs), la cual controla, en gran parte, la topografía del área de estudio (Fig. 3.15) y se asocia a mineralización metálica, reconociéndose piques mineros en la zona (Fig. 3.16C); esta alteración debió haber ocurrido posterior a la depositación de las Volcanitas Melozal y podría

correlacionarse con los procesos de mineralización y alteración ocurridos en la Cordillera de la Costa durante el Cretácico Superior (ej. Cotton 1998; Fuentealba 2002), petrográficamente esta alteración se observa como cristales de cuarzo secundario con extinción ondulosa que reemplazan total a parcialmente la mineralogía primaria de las rocas (Contreras 2017).

Posteriormente, intruyendo a las rocas volcánicas se reconoce un cuerpo de menor dimensión denominado Dioritas Cerro Manantial (Mdi), ubicado en el cerro homónimo (Fig. 3.15), el cual corresponde a una dorita cuarcífera de grano medio a fino (Contreras 2017) que se asocia a los cuerpos subvolcánicos de edad Mioceno de 18 Ma (Hauser 1995).

A continuación, la Unidad Depósitos de oleada piroclástica (Qop) le concede la principal característica a la geología y a los suelos del área de San Javier, se trata de un Depósito piroclástico del Tipo Surge que puede correlacionarse con el Abanico piroclástico del curso medio del río Perquilauquén de edad Pleistoceno, descrito por Moreno & Varela (1985), depositados sobre la llanura de inundación (Fig. 3.15); esta unidad corresponde a capas sucesivas de cenizas (Fig. 3.16D) y sedimentos clásticos, diferenciadas por el tamaño de grano. Petrográficamente corresponde a una toba vítrea de textura fragmental con alto contenido de vidrio y esquirlas (Contreras 2017). Sobre esta unidad se dispone la Unidad lacustre-aluvial (Qsl), que se conforma por sedimentos muy finos y algunas capas de conglomerados con clastos de composición granítica (posiblemente de la unidad Jrm) y de la toba antes descrita (Fig. 3.16E), que Moreno & Varela (1985) integran dentro del Abanico Perquilauquén, por tanto, se le asigna una edad Pleistoceno a posiblemente Holoceno.

Las unidades de edad Holoceno, corresponden a depósitos fluviales que han sido subdivididos por Contreras (2017) en: Depósitos fluviales antiguos (Qfa) que es una secuencia semiconsolidada grano-decreciente, perteneciente a terrazas fluviales del río Loncomilla (Fig. 3.16F); Depósitos fluviales secundarios (Qfs) constituido por sedimentos no consolidados que rellenan cursos fluviales secundarios y Depósitos fluviales (Qf) que son los sedimentos no consolidados activos del cauce del río Loncomilla (Fig. 3.16F).

### **3.5.3 CLIMA DE SAN JAVIER**

El clima local de este sector es de tipo mediterráneo subhúmedo con un verano seco y un invierno húmedo, lluvioso y frío. La precipitación anual, según Nahrwold (2014), es en promedio de 884 mm y la temperatura media anual es de 14,4°C

Sin embargo, el análisis de los últimos 26 años (López 2018), indica un promedio anual de precipitaciones de 681 mm, con una reducción de las precipitaciones durante los últimos ocho

años, aunque esta disminución no es tan marcada como lo reconocido en las área de estudio más al norte. Las mayores precipitaciones se registraron en los años 1992 (1138 mm) y el año más seco en este periodo correspondió a 1998 (296 mm).

En los dos años en que se realizan las mediciones en la viña de San Javier (Fig. 3.17), las temperaturas medias alcanzan a 13,3°C en el año 2014 y a 13,7°C en el año 2015; mientras que las precipitaciones anuales son mayores en año 2014 (607,1 mm) respecto a los 563,9 mm totales del año 2015 (Tabla 3.7).

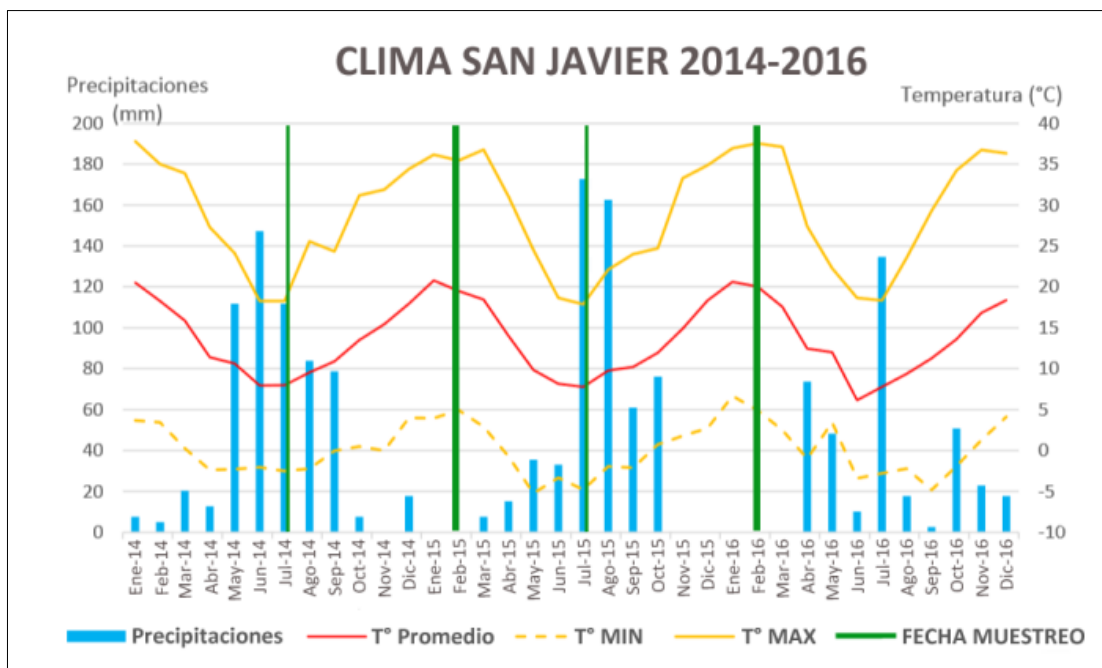


Figura 3.17. Gráfico con precipitaciones y temperatura entre los meses enero de 2014 y diciembre de 2016 en el área de San Javier. Datos obtenidos desde la estación J. Bouchon en la Red Meteovid de Vinos de Chile. Imagen modificada de López (2018).

Tabla 3.7. Precipitaciones totales y valores promedio de temperatura media, mínima y máxima en los años 2014 y 2015 y en los meses previos a las temporadas de medición en la viña de San Javier.

Año/ Temporada	Período	Precipitaciones totales (mm)	Temperatura media (°C)	Promedio T° mínimas (°C)	Promedio T° máximas (°C)
<b>2014</b>	Ene - Dic 2014	607,1	13,3	0	28,5
<b>2015</b>	Ene - Dic 2015	563,9	13,7	-0,1	28,3
<b>Invierno 2014</b>	Abr - Jul 2014	383,5	9,5	-2,3	22,0
<b>Verano 2015</b>	Nov 14 - Feb 15	17,8	18,4	3,2	34,5
<b>Invierno 2015</b>	Abr - Jul 2015	256,5	10,0	-3,5	23,0
<b>Verano 2016</b>	Nov 15 - Feb 16	0	18,5	4,0	35,7



El análisis de las precipitaciones y temperaturas realizado para el mes específico de medición y los tres meses anteriores (Tabla 3.7), indican que en la temporada Invierno 2014 las precipitaciones anuales fueron superiores, con temperaturas medias, mínimas y máximas inferiores, respecto al Invierno de 2015. Por otra parte, en la estación estival no se registraron lluvias en la temporada Verano 2016, mientras que las precipitaciones totales alcanzaron a 17,8 mm en Verano 2015; con temperaturas medias, máximas y mínimas, superiores a levemente superiores en el Verano de 2016 (Tabla 3.7).

#### **3.5.4 HIDROGEOLOGÍA E HIDROGEOQUÍMICA DE SAN JAVIER**

En la microcuenca de San Javier se reconocen cinco unidades hidrogeológicas: Unidad de roca, Unidad depósitos coluviales, Unidad depósitos piroclásticos, Unidad depósitos fluviales secundarios y Unidad de depósitos fluviales (López 2018). La Unidad de roca se compone por las rocas presentes en los límites y zonas altas de la cuenca, presenta bajo potencial hidrológico y genera una barrera lateral de los acuíferos. La Unidad coluvial, asociada al piedemonte de cerros, presenta alta permeabilidad y su importancia hidrogeológica radica en que es una zona de recarga del acuífero. La Unidad depósitos piroclásticos, está constituida por la toba vítrea (Unidad litológica de oleada piroclástica) y por los depósitos lacustre aluviales (Fig. 3.15), su permeabilidad es baja y forma una capa que impide la infiltración del agua, por lo tanto, es de baja a moderada importancia hidrogeológica. La Unidad depósitos fluviales secundarios, corresponde a sedimentos que rellenan cursos fluviales secundarios (Fig. 3.15), es de alta permeabilidad y presenta importancia hidrogeológica mediana, ya que su extensión es limitada y de baja profundidad. Por último, la Unidad de depósitos fluviales, corresponde a los depósitos fluviales antiguos y actuales del río Loncomilla, los que tienen una alta permeabilidad y gran capacidad de almacenar y conducir el agua, por lo tanto, son de alto potencial hidrogeológico, sin embargo, su distribución es local (López 2018).

El análisis de piezometría y flujos subterráneos, muestra que a diferencia de las otras microcuencas en estudio, en San Javier la profundidad de los niveles freáticos no cambia considerablemente entre las estaciones (Tabla 3.8), variando desde profundidades medias de 4,2 mbs (metros bajo superficie) en invierno a 4,9 mbs en verano. Por otra parte, la dirección del flujo subterráneo en la temporada Invierno 2015 posee una dirección desde norte a sur y desde oeste a este, es decir desde las partes topográficamente altas de la cuenca hacia el río Loncomilla, mientras que en Verano 2016 el régimen de flujo es inverso, con una dirección que va desde este a oeste, lo cual implica que, durante el verano, es el drenaje del río Loncomilla el que genera la recarga del acuífero (López 2018). Esto puede deberse a que el acuífero medido mayoritariamente en norias, corresponde a un acuífero libre somero (López 2018), el cual

puede ser favorablemente recargado a través de la Unidad depósitos fluviales. Lo anterior, también explica la leve variación en la profundidad del nivel freático entre temporadas. Se destaca además, que en ambas temporadas, existen isopiezas concéntricas en torno algunos pozos de extracción, aunque son más abundantes los pozos que presentan estos conos de depresión durante las mediciones de verano.

Tabla 3.8. Piezometría y dirección de flujo de las aguas subterráneas de San Javier (López 2018).

	N° mediciones	Media (mbs)	Mín. (mbs)	Máx. (mbs)	Dirección flujo
Invierno 2015	19	4,2	0,2	12,7	Desde la cuenca al río Loncomilla
Verano 2016	37	4,9	0,9	12,7	Desde el río Loncomilla a la cuenca

\*mbs: metros bajo superficie.

Las muestras de aguas subterráneas de San Javier corresponden a aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésica sódicas, mientras que en un pozo (M9) ubicado 1,5 km al oeste de la viña, el agua subterránea se clasifica como clorurada cálcica, tanto en la temporadas de invierno como en la de verano. La química de las aguas indica que el principal proceso hidrogeoquímico de la cuenca es la meteorización de vidrio volcánico y silicatos, sin embargo, además debido a procesos de evaporación y concentración de iones, se genera la precipitación durante el verano de carbonatos. Adicionalmente, altos contenidos de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  y P, se interpretan como la infiltración hacia el acuífero somero de aguas negras y grises, mientras que la alta correlación de los elementos Cl,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , U, P e Y, junto con elevados contenidos de  $\text{SO}_4^{2-}$  indican que la química de las aguas subterráneas está influenciada por el uso de fertilizantes (López 2018).

### 3.5.5 SUELOS DE SAN JAVIER

Los suelos reconocidos en la microcuenca de San Javier han sido categorizados por Luzio (2010) como suelos en cuencas de sedimentación lacustre y suelos sobre toba volcánica. Por su parte, CIREN (1997a) describe en el área de estudio las series Caliboro (CLB) y Vaquería (VAQ).

La Serie Caliboro es clasificada como un suelo de tipo Alfisol (CIREN 1997b) y ésta se correlaciona con los suelos desarrollados sobre el Depósito lacustre aluvial. Esta serie se encuentra ubicada en posición de terraza remanente, en topografías casi planas de 1 a 3%. Son suelos moderadamente profundos, entre 50 a 90 cm, limitados por una capa arcillosa fuertemente compactada y un duripán cementado por sílice y hierro (probablemente correspondiente a la capa de toba). La textura de los suelos varía desde franco arcillo arenosa en superficie a arcillosa en profundidad, los colores dominantes en estos suelos corresponden a

pardo grisáceo oscuro (matiz 10YR) en los horizontes superficiales, variando hacia colores pardo grisáceo a pardo amarillento (matices 2.5YR y 10YR) en profundidad. El drenaje de los suelos es imperfecto de permeabilidad muy lenta y escurrimiento superficial lento. El nivel freático fluctúa entre 20 a 60 cm bajo superficie. Según CIREN (1997b) estos suelos son sedimentarios de origen pumicítico.

Para el caso de los suelos desarrollados sobre toba, éstos corresponderían a la Serie Vaquería, los cuales han sido clasificados taxonómicamente como Inceptisol (CIREN 1997b). Los suelos de esta serie se ubican en posición de terraza intermedia, en zonas de topografía plana a suavemente ondulada, con pendientes que varían entre 0.5 a 5%. Son suelos de textura franca y color pardo a pardo oscuro (matiz 10YR) en superficie, mientras que en profundidad la textura es franco arenosa fina de color pardo oscuro (matiz 10YR). La profundidad efectiva de los suelos es de 20 a 50 cm, ya que están limitados por la presencia de un duripán cementado por sílice y hierro (que puede corresponder a la capa de toba), la que impide el desarrollo de raíces y genera un drenaje imperfecto a pobre, en que el nivel freático se posiciona entre los 20 a 45 cm de profundidad. El origen de estos suelos es descrito por CIREN (1997b) como un sustrato sedimentario formado por material volcánico.

### 3.6 TABLA RESUMEN DE LAS VIÑAS

Para comparar y resumir los principales resultados a escala de cuenca, se presentan en la tabla 3.9, la caracterización geográfica, geomorfológica y geológica de las viñas.

Tabla 3.9. Tabla comparativa de la geografía, geomorfología y geología de las cuatro viñas estudiadas.

<b>Viña</b>	<b>Casablanca</b>	<b>San Antonio</b>	<b>Santa Cruz</b>	<b>San Javier</b>
<b>Unidad Morfológica</b>	Cordillera de la Costa	Vertiente oeste de la Cordillera de la Costa	Cordillera de la Costa (Cordón de Tagua-Tagua)	Cordillera de la Costa y Depresión Intermedia
<b>Geomorfología de la cuenca</b>	Zona de piedemonte de la Cordillera de la Costa (CC) y valle fluvial	Terraza de abrasión marina, relieve en erosión	Zona de piedemonte de la CC, llanura de inundación y terraza fluvial	Zona de piedemonte de la CC, llanura de inundación y terraza fluvial
<b>Cuenca hidrográfica</b>	Área: 83 km <sup>2</sup> Estero Perales y quebradas régimen esporádico	Área: 109,4 km <sup>2</sup> Estero El Sauce y quebradas régimen esporádico	Área: 54 km <sup>2</sup> Río Tinguiririca perenne y quebradas esporádicas	Área: 135 km <sup>2</sup> Río Loncomilla, esteros, quebradas y canales de régimen perenne
<b>Geología de la cuenca (Principales litologías)</b>	Granitoides y Depósitos semiconsolidados	Rocas metamórficas y Rocas sedimentarias de la Fm. Navidad	Granitoides, Rocas volcánicas Fm. Lo Valle y sedimentos semiconsolidados	Depósitos piroclásticos y lacustres, Rocas volcánicas Fm. Lo Valle y Granitoides

Tabla 3.9.Continuacion.

<b>Viña</b>	<b>Casablanca</b>	<b>San Antonio</b>	<b>Santa Cruz</b>	<b>San Javier</b>
<b>Clima actual Nahrwold (2014)</b>	Mediterráneo semiárido con fuerte influencia marina	Mediterráneo con influencia costera	Mediterráneo subhúmedo con veranos prolongados	Mediterráneo subhúmedo
<b>Precipitaciones/ T° media (anual) Nahrwold (2014)</b>	450 mm 13,6°C	380 mm 14,5°C	600 mm 14,7°C	884 mm 14,4°C
<b>Precipitaciones (Pp) 20-26 años</b>	402 mm	422,2 mm	670 mm	681 mm
<b>Pp / T° media Invierno 2014</b>	272 mm 9,2 °C	284,8 mm 11,0°C	586,6 mm 10,4°C	383,5 mm 9,5°C
<b>Pp / T° media Verano 2015</b>	3 mm 15,1°C	17,8 mm 13,9°C	42,2 mm 18,7°C	17,8 mm 18,4°C
<b>Pp / T° media Invierno 2015</b>	198 mm 9,9°C	220,4 mm 10,5°C	454,7 mm 11,1°C	256,5 mm 10,0 °C
<b>Pp / T° media Verano 2016</b>	13 mm 16,5°C	62,0 mm 14,4°C	81,3 mm 18,1°C	0 mm 18,5°C
<b>Unidades hidrogeológicas (López 2018)</b>	Unidad de roca. Unidad de piedemonte. Unidad aluvial.	Unidad de roca. Unidad Navidad. Unidad coluvial-fluvial.	Unidad de roca. Unidad fluvial. Unidad aluvial. Unidad coluvial.	Unidad de roca. U. Dep. coluviales. U. Dep.piroclásticos. U. Dep. fluviales secundarios. U. Dep. fluviales.
<b>Nivel freático medio Invierno</b>	19,0 mbs	2,6 mbs	2,2 mbs	4,2 mbs
<b>Nivel freático medio Verano</b>	26,0 mbs	5,1 mbs	8,8 mbs	4,9 mbs
<b>Procesos hidrogeoquímicos que influyen en la química del agua subterránea (López 2018)</b>	Meteorización de plagioclasas, biotitas y anfíboles. Influencia de agroquímicos.	Disolución de halita. Meteorización de silicatos y aluminosilicatos. Influencia de agroquímicos.	Meteorización de plagioclasas y anfíboles. Infiltración aguas negras y grises. Influencia agroquímicos.	Meteorización vidrio volcánico y silicatos. Precipitación de carbonatos en verano. Infiltración aguas negras y grises. Influencia agroquímicos.
<b>Suelos</b>	Serie Tapihue en cuartel Piedemonte: Inceptisol. Serie Lo Vásquez en cuartel Cerro: Alfisol (CIREN 2016).	Serie Bochinche: Molisol (CIREN 1997a)	Serie Mancumán en cuartel Isla: Entisol. Serie La Lajuela en cuartel Pendiente: Alfisol (CIREN 2010)	Serie Vaquería en Mv (volcánico): Inceptisol. Serie Caliboro en Ms (lacustre): Alfisol (CIREN, 1997b)

## CAPITULO 4. RESULTADOS

### 4.1 INTRODUCCION

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada viña a partir del levantamiento geológico a escala de viñedo y a escala de cuartel, que implicó el muestreo de rocas durante el mapeo a escala 1:20.000, el mapeo a escala 1:5.000 de los cuarteles en estudio, las mediciones fisicoquímicas y el muestreo de suelo en tres horizontes, el muestreo de frutos y el muestreo de aguas de lluvia, agua de riego y agua subterránea.

La petrografía y geoquímica de las rocas parentales de los viñedos se expone de manera comparativa a modo de diferenciar y caracterizar el origen litológico a partir del cual se formaron los suelos. Posteriormente, para cada viñedo se describen los resultados del levantamiento geo-pedogenético de perfiles de suelo, las mediciones fisicoquímicas de suelos, la geoquímica de roca total y de la fase biodisponible del suelo, la mineralogía limo-arcilla, la mineralogía de arcillas, las propiedades físicas de suelo: color, textura y densidad aparente, las propiedades químicas del suelo: contenido de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico, la química de los frutos y de las aguas.

Los grupos de elementos químicos presentados este capítulo son denominados “nutrientes” y “metales”. Los nutrientes seleccionados corresponden a los “nutrientes minerales esenciales” (EMN): P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Na, Al y Rb, los que geoquímicamente se clasifican como elementos mayores y traza. Para los resultados de rocas y suelo además se agrega el Ti que fue considerado como elemento inmóvil en el sistema roca-suelo. Por otra parte, los elementos traza, denominados metales (MET), que serán presentados en este capítulo corresponden a los metales y metaloides: Cr, Ni, Pb, As, Sn, Mo, Sb, Cd, Ag, Hg y Au, además se consideran dentro de este grupo los elementos Cu y Zn, que también son analizados dentro del grupo nutrientes. Por último, cabe mencionar que los resultados y el análisis geoquímico del grupo de elementos de las tierras raras (REE) serán expuestos en el Capítulo 5.

### 4.2 CONTROL DE CALIDAD Y ANALISIS DE DATOS

#### 4.2.1 CONTROL DE CALIDAD DE ANÁLISIS QUÍMICOS

Los análisis químicos conllevan errores de medición que equivalen a una sumatoria de todos los errores que pueden ser introducidos durante el muestreo, preparación de la muestra y lectura analítica (Stanley & Smees 2007). De este modo, el control de calidad se realiza para medir el



grado de confianza en los resultados químicos; para esto se utilizan duplicados de terreno y duplicados analíticos con el objetivo de medir la reproducibilidad o precisión de los datos, además de muestras estándares que permiten evaluar la exactitud de las mediciones.

En este trabajo se utiliza la metodología de control de calidad aplicada por Castillo (2012), definiendo el error total mediante los duplicados de terreno, los que corresponden a un 10% de las muestras colectadas para todas las matrices en estudio (suelo, agua y bayas); y para la medición del error analítico se consideran duplicados analíticos, estándares y muestras blanco que son introducidas en los laboratorios.

En términos cuantitativos, el control de calidad (QA/QC) se realiza por medio de los duplicados de terreno y analíticos, determinando los errores relativos a través del cálculo del porcentaje del coeficiente de variación (%CV) que presenta un par de duplicados, para esto se aplica la fórmula (4.1) descrita en Stanley & Lawie (2007):

$$\overline{CV}\% = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( 2 \frac{(x_{1i} - x_{2i})^2}{(x_{1i} + x_{2i})^2} \right)} \times 100 \quad (4.1)$$

En donde  $x_1$  y  $x_2$  son un par de muestras original y su duplicado y  $n$  es el número de pares de duplicados.

#### **4.2.1.1 Metodología del QA/QC**

El control de calidad se realiza en conjunto para todas las muestras de control tomadas en todas las viñas. En primera instancia se determinan las variables aptas utilizando para esto el porcentaje de muestras que se encuentran sobre el límite de detección. Aquellas variables que poseen más del 50% de los datos sin respuesta analítica son catalogadas como “Baja Resp.”, mientras que aquellas variables que poseen el 100% de las muestras bajo el límite de detección se nominan como “Sin Resp.”. Para las variables con más de 50% de los datos con respuesta analítica, se corrigen los valores que están bajo el límite de detección (LMD), por la mitad de ese valor, es decir si el LMD es < 2 ppm, se debe cambiar el dato por 1 ppm.

Luego, para todas las variables aptas se define el error total mediante el cálculo del %CV con los pares de duplicado de terreno. El grado de confianza de la medición de cada variable se categoriza según el siguiente criterio: Variables que posean un error total menor a 15% se consideran “Confiables”, variables con un error total entre 15% y 25% son clasificadas como

moderadamente confiables (Moderada) y variables con un error total superior a 25% se definen como no confiables (Alto error).

#### **4.2.1.2 Geoquímica de suelos**

Para el análisis de química total de suelo se consideran 15 pares de muestras “original-duplicado”, mientras que para las mediciones de la fase biodisponible se cuenta con 12 pares de muestras en la temporada Verano 2015 y 12 pares original-duplicado para las mediciones de biodisponibilidad en Verano 2016.

En la tabla A4.1 (Anexos) se reportan el porcentaje de las muestras que se encuentran bajo el límite de detección y los coeficientes de variación para las variables consideradas en este estudio. Las variables que tienen baja respuesta analítica son reanalizadas por cada viña en particular, determinando que en algunas viñas su respuesta analítica es buena, como es el caso de Hg en los suelos de Santa Cruz o de Au en las viñas de Casablanca y San Antonio (Tabla A4.2, Anexos).

Para los nutrientes el error total es bajo a moderado ( $\%CV_T$ : 0,9-23,4); por el contrario, el grupo de metales posee un mayor número de variables con baja respuesta analítica (Tabla A4.1, Anexos), tales como Cd en suelo total y en la fase biodisponible Hg y Sb en ambas temporadas, Sn en la temporada V15 y As en la temporada V16; variables sin respuesta analítica como Ag en suelo total, Cr en ambas temporadas de la fase biodisponible y Sn en la temporada V16 y, además, variables con alto error total ( $\%CV_T$ : 26,4-83,6) para Hg, Sb, Cr, Sn, Mo y Au en suelo total y Au, As (temporada V15) y Pb (temporada V16). Finalmente los metales con suficiente grado de confianza ( $\%CV_T$ : 4,5-24,5) corresponden a Pb, As y Ni para el suelo total, Cd, Ni, Mo y Ag en ambas temporadas de la fase biodisponible y Pb solamente en la temporada de medición de Verano 2015.

#### **4.2.1.3 Hidrogeoquímica e hidroquímica**

Para el control de calidad de muestras de aguas se utilizan tres muestras duplicadas, dos de éstas corresponden a aguas subterráneas y una a agua de lluvia. Los resultados del porcentaje de muestras bajo el límite de detección y de los coeficientes de variación para cada variable medida en las muestras de aguas se presentan en la Tabla A4.3 (Anexos).

Para la matriz agua se observa baja respuesta analítica y alto error analítico para el grupo de los elementos de las tierras raras y, por tanto, no pueden ser consideradas en estudios posteriores. Para los nutrientes y metales se tiene que Hg y Ag no presentan respuesta analítica y Fe, Cd, Pb, Ni y Au poseen más del 72% de las muestras bajo el límite de detección. Además

alto error analítico ( $\%CV_A=41,2$ ) se obtiene para Sb. Para todas las demás variables: P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Cu, Na, Al, Rb, As, Cr y Sn, excepto Mo, el error total ( $\%CV_T$ ) es alto al considerar las muestras duplicadas de aguas de lluvias ( $\bar{x}_{\%CV}=22,2\%$ ), sin embargo, es muy bajo ( $\%CV_T < 5,3$ ) al utilizar sólo muestras duplicadas de aguas subterráneas esto supone una baja confiabilidad en la metodología de muestreo y análisis de aguas de lluvias (Tabla A4.3).

Finalmente, dado un error total relativamente alto al considerar los duplicados de agua de lluvia, sumado al bajo número de muestras de agua de lluvia analizadas, se determina que los resultados aquí obtenidos para esta matriz sólo se deben utilizar de manera referencial.

Adicionalmente, López (2017) realizó un control de calidad determinando la electroneutralidad de cationes y aniones analizados en el marco de su tesis, en ésta se determina que sólo una muestra de agua subterránea de la viña de San Javier (GW-V16-M1) y dos muestras de agua de lluvia (RW-I15-V2 y RW-I15-C1) de las viñas de Casablanca y San Antonio, respectivamente, poseen porcentajes de error superiores a los establecidos. Sin embargo, la muestra de agua subterránea tiene un error de 16% y se decide mantenerla en la base datos. Para el caso de las aguas lluvias, éstas se mantienen de modo referencial.

#### **4.2.1.4 Química de frutos**

El control de calidad de las variables medidas en las muestras de frutas se realiza con cuatro muestras duplicadas en Verano 2015 y cuatro en Verano 2016. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla A4.4 (Anexos).

El control de calidad de la campaña Verano 2015 indica errores totales promedios de 10,6% para todas las variables denominadas nutrientes, con un rango de error total de 3% para Mg y 18,4% para Na. Para el caso del Al, éste tiene el 100% de las muestras sin respuesta analítica. De igual forma, los metales Cd, Pb, Hg, As, Sb, Cr, Ni, Mo, Au y Ag no presentan respuesta analítica y Sn tiene baja respuesta.

En la temporada Verano 2016, se tienen mayores errores totales para los nutrientes ( $\bar{x}_{\%CV}=25,3\%$ ), los elementos S, Mn, Zn, Cu y Na presentan alto error total ( $\%CV_T$ : 25,0-68,0) y los demás nutrientes poseen bajos errores totales que van desde variables confiables a moderadamente confiables ( $\%CV_T$ : 2,7-24,8). Las variables Al, Pb, As, Ni, Sn, Mo y Ag poseen baja respuesta analítica, mientras que Cd, Hg y Sb no presentan muestras con respuesta analítica. Por último Cr es el único metal con bajo error total ( $CV\%=11,5$ ).

#### 4.2.1.5 Resumen del Control de Calidad

En la tabla 4.1 se presentan las variables que presentan errores totales ( $\%CV_T$ ) y analíticos ( $\%CV_A$ ) menor a 25%. En general, los resultados del control de calidad indican que las variables con más de 50% de los datos bajo el límite de detección y con errores totales ( $\%CV_T$ ) mayores a un 25% no deberían considerarse en análisis estadísticos multivariados, no obstante, de manera referencial los datos serán utilizados para observar patrones de primer orden en gráficos multielemento, en escala de trabajo a nivel cuartel y calicata, aun cuando se debe tener en consideración que aquellas variables con alto error total no son suficientemente confiables.

Tabla 4.1. Resumen de variables confiables según el control de calidad.

	<b>Variables confiables a moderadamente confiables</b>
<b>Suelo Total</b>	P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Na, Al, Rb, Pb, As, Ni, REEs
<b>Biodisponible V15</b>	P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Al, Rb, Cd, Pb, Ni, Mo, Ag, REEs
<b>Biodisponible V16</b>	P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Al, Rb, Cd, Ni, Mo, Ag, REEs
<b>Aguas</b>	P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Cu, Na, Al, Rb, As, Cr, Sn, Mo
<b>Frutas V15</b>	N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Cl, Na, Rb
<b>Frutas V16</b>	N, P, K, Ca, Mg, Fe, B, Cl, Cr

#### 4.2.2 ANÁLISIS DE DATOS

La geoquímica de las rocas parentales para los grupos de elementos nutrientes y metales, se analiza comparativamente para cada viña, utilizando para esto gráficos multielemento con el fin de contrastar sus diferencias geoquímicas.

Para el levantamiento geo-pedogenético se integra la información obtenida a partir de la descripción de los perfiles de suelo, generando mapas de detalle de los cuarteles en estudio.

Los resultados de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos del suelo considerados conductividad eléctrica (CE), pH y temperatura ( $T^\circ$ ) y el estado óxido-reducción (Eh), se presentan según las cuatro temporadas de medición en gráficos de caja (llamados también gráficos de caja y bigote) y gráficos de probabilidad acumulada. Además para comparar los valores promedios de los parámetros fisicoquímicos medidos en las distintas temporadas en cada viña, se realizan análisis no paramétricos Kruskal-Wallis con un 95% de confianza.

Con el objetivo de reconocer diferencias geoquímicas en nutrientes y metales, los resultados de química de suelo total y de la fase biodisponible se presentan categorizados según los distintos materiales parentales que componen los suelos de cada viña. Para esto se determina la distribución estadística de los suelos mediante gráficos de caja y el cálculo de los estadígrafos básicos. Además, la concentración de metales y metaloides considerados es comparada con

los límites permitidos para suelos agrícolas según la Norma de calidad de suelos de Canadá (CCME 2016).

La química inorgánica de los frutos se presenta de forma separada para las dos temporadas de medición de nutrientes y metales, además se categorizan según los dos cuarteles en estudio para el caso de las viñas de Casablanca, San Antonio y Santa Cruz, y según los dos materiales parentales en la viña de San Javier. Para esto se utilizan los estadígrafos básicos y gráficos de caja. Adicionalmente los contenidos de metales Cu, Zn, Pb, As y Sn son comparados con el Reglamento sanitario de los alimentos (1997) de Chile y con el Código Alimentario Argentino (2017) para Ag.

La fisicoquímica y los resultados de la química de aguas, de las temporadas invierno 2015 y verano 2016, se exponen de manera comparativa para las matrices agua lluvia, agua de tranque, agua de riego y agua subterránea, a través de gráficos de caja para los parámetros CE, pH, T° y Eh, nutrientes y metales. Los datos químicos son referidos a la Norma chilena de riego (1978) y a la Guía de calidad de aguas de Canadá (CCME 1999). Cabe destacar que los datos de fisicoquímica de aguas presentados corresponden al promedio de tres mediciones.

La semicuantificación y la caracterización de la mineralogía limo-arcilla y de la mineralogía de arcillas (filosilicatos) de la roca parental y los suelos seleccionados se presentan por medio de gráficos de barra para cada perfil de suelo, en los horizontes A, B, C y ocasionalmente C2. Del mismo modo, son expuestas las propiedades del suelo como contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, densidad aparente y contenido de las fracciones arcilla, limo y arena. Además se presentan como antecedentes características como textura y color Munsell de los suelos.

Los *softwares* utilizados para el análisis de los datos corresponden a Excel v2010, loGas v6.3.1. y ArcGis v10.4.1.

### **4.3 PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE ROCAS PARENTALES**

En cada viña se seleccionan una a dos muestras de roca que se definen como representativas de las rocas parentales desde la cual provienen los suelos estudiados. En Casablanca se estudian las rocas Tonalita (muestras VR-4 y VR-6) y Aplita (VR-5), en San Antonio se define como roca parental una Arcosa (CP-12D), en Santa Cruz la roca parental corresponde a una Granodiorita (muestras LR-4 y LR-8) y en San Javier una Toba vítrea (MR-26) es considerada como roca parental. Mayores características texturales y mineralógicas de las rocas se presentan en la tabla 4.2.



Tabla 4.2. Mineralogía y textura de las rocas parentales. Información obtenida de Contreras (2017).

Viña	Roca Parental	Minerales primarios	Minerales accesorios	Textura de la roca
Casablanca	Tonalita de hornblenda y biotita	Plagioclasa, cuarzo, biotita, hornblenda, feldespato potásico.	Apatito, circón, epidota, esfeno, minerales opacos.	Roca fanerítica de grano medio a fino (0.5-3 mm), cristales sub-euhedrales a euhedrales.
	Aplita de turmalina	Cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, turmalina, muscovita.	Epidota	Roca fanerítica de grano medio a fino (0.3-5 mm), cristales subhedrales a anhedrales
San Antonio	Arcosa	Plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, hornblenda, minerales opacos (óxidos de Fe).	Circón, epidota.	Roca granular, tamaño arena media (moda: 0.2 mm), granos esféricos redondeados a subredondeados.
Santa Cruz	Granodiorita de hornblenda y biotita	Plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, hornblenda, biotita.	Minerales opacos, epidota, esfeno.	Roca fanerítica de grano medio a fino (0.1-2.5 mm), cristales sub-euhedrales a euhedrales
San Javier	Toba vítrea	Vidrio volcánico, cuarzo, plagioclasa.	Minerales opacos, epidota, zeolitas.	Roca afanítica de grano muy fino (máximo: 0.3 mm). Granos subangulares a angulares.

En la Figura 4.1 se presentan los patrones de concentración de los nutrientes y metales en las rocas parentales. A partir de estos gráficos puede observarse que las rocas graníticas Tonalita de Casablanca y Granodiorita de Santa Cruz tienen patrones de nutrientes similares (Figs. 4.1A y 4.1B), con mayores concentraciones de Ca, Fe y Mg para la Tonalita (Casablanca) y de Na, K, Rb y Cu para la Granodiorita (Santa Cruz). Por su parte las rocas Aplita de Casablanca, Arcosa de San Antonio y Toba de San Javier tienen patrones particulares, diferenciándose claramente entre sí (Figs. 4.1A y 4.1C).

Al comparar los contenidos de las diferentes rocas en estudio, se tiene que la Tonalita (Casablanca) presenta las mayores concentraciones de Al y los menores contenidos de Cu, también en Casablanca, la roca Aplita posee las mayores concentraciones de K y Rb, pero los más bajos valores en Fe, Mg, Ti, Mn y Zn. En San Antonio la Arcosa se caracteriza por los más altos contenidos de Ca, Fe, Mg, Ti, Mn, P, Zn y Cu y las menores concentraciones de K, Rb y Na. La Granodiorita de Santa Cruz posee las mayores concentraciones de Al y Na. Finalmente la Toba vítrea de San Javier, en comparación a las otras rocas, posee en general un bajo contenido en todos los elementos, a excepción de Rb, y particularmente con las menores concentraciones en Al, Ca, Na y P (Tabla A4.5, Anexos).

En relación al contenido de metales (Tabla A4.5, Anexos), la roca Arcosa de San Antonio presenta concentraciones un orden de magnitud mayor para Cr, Ni y As respecto a las otras rocas parentales en estudio, además de los mayores contenidos para Pb, Sn, Sb y Cd (Figs. 4.1D y 4.1F); mientras que los metales Ag, Hg y Au poseen concentraciones bajo el límite de detección. Por el contrario la roca Aplita de Casablanca sólo muestra respuesta analítica para

Au, Ni y Pb y las concentraciones de estos dos últimos elementos son las menores en comparación al resto de rocas parentales.

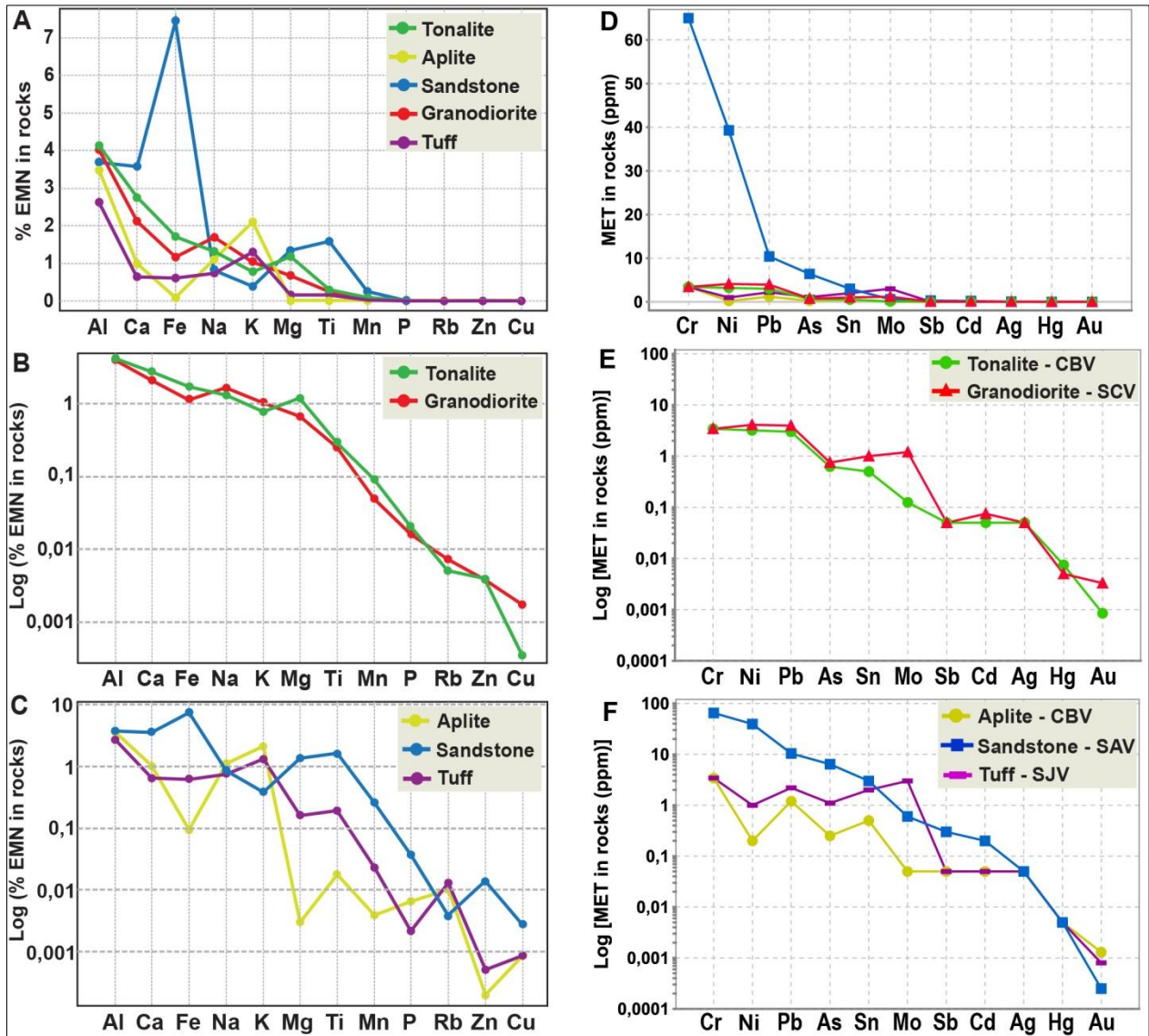


Figura 4.1 Gráficos multielemento comparativos de las rocas parentales de las cuatro viñas en estudio. Contenido de nutrientes en porcentaje (A) y de metales en ppm (D) en las cuatro viñas. Contenido de nutrientes (B) y de metales (E) en escala logarítmica de rocas parentales graníticas de Casablanca y Santa Cruz. Contenido de nutrientes (C) y de metales (F) en escala logarítmica de las rocas parentales Aplita de Casablanca, Arenisca de San Antonio y Toba de San Javier.

Las rocas graníticas de Casablanca y Santa Cruz presentan un patrón de metales relativamente similar entre sí (Fig. 4.1E), sin embargo, la roca Granodiorita de Santa Cruz posee mayores valores respecto a la Tonalita de Casablanca en los metales Ni, Pb, As, Sn, Mo y Au, este último elemento además posee la más alta concentración en comparación a las otras rocas parentales. Sólo Hg es mayor para la Tonalita de Casablanca, siendo esta litología la única que posee respuesta analítica para este elemento. Finalmente la Toba de San Javier muestra las

mayores concentraciones de Mo respecto al resto de rocas parentales, además con respuesta analítica para los metales Ni, Pb, As y Sn (Figs. 4.1D y 4.1F).

## 4.4 RESULTADOS VIÑA DE CASABLANCA

### 4.4.1 GEOLOGÍA A ESCALA DE CUARTEL (1:5.000) EN CASABLANCA

En Casablanca se estudian los cuarteles denominados “Piedemonte” y “Cerro” por medio de la descripción de seis perfiles de suelo, en cada cuartel. Los perfiles VP-1 a VP-6 corresponden al cuartel Piedemonte, mientras que los perfiles VC-7 a VC-12 forman parte del cuartel Cerro. Además se estudia el perfil de suelo VP-13 que se ubica en una zona no cultivada, dentro del cuartel Piedemonte (Fig. 4.2).

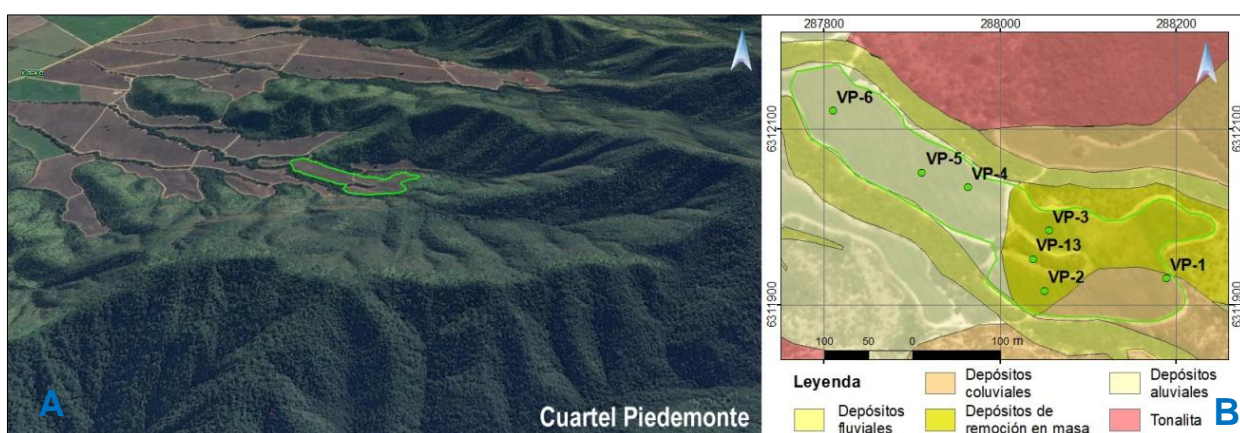


Figura 4.2 Cuartel Piedemonte de la viña de Casablanca (A) Contexto geomorfológico del cuartel. Imagen obtenida desde Google Earth. (B) Mapa geológico a escala cuartel.

#### 4.4.1.1 Cuartel Piedemonte (VP), Casablanca

El cuartel Piedemonte (VP) tiene una superficie aproximada de 4,1 ha, se emplaza en el piedemonte de la Cordillera de la Costa, con una exposición hacia el WNW con una leve pendiente de aproximadamente 5° en esta misma dirección (Fig. 4.2A). Los perfiles de suelos estudiados tienen profundidades que varían entre 85 y 102 cm.

El material parental corresponde a depósitos mayoritariamente monomícticos, provenientes de la erosión de los cerros circundantes conformados por rocas graníticas, que en este sector corresponde a una Tonalita de hornblenda y biotita, intruída por numerosos diques de Aplita de turmalina (Contreras *et al.* 2015).

Por medio de características geomorfológicas y propiedades texturales de los depósitos, esto último observado a través de las calicatas, se distinguen tres tipos de depósitos sedimentarios clásticos. En la calicata VP-1 el material parental corresponde a un depósito coluvial



semiconsolidado que sobreyace a un depósito de remoción en masa, el que presenta un mayor grado de consolidación; el depósito de remoción en masa es también reconocido en los perfiles de suelos VP-2, VP-3 y VP-13 (Fig. 4.2B), en donde está sobreyaciendo a un depósito coluvial más antiguo (Fig. 4.3). Por su parte, en las calicatas VP-4, VP-5 y VP-6, ubicadas a menor altura que las calicatas antes nombradas, se reconoce un depósito de características aluviales (Figs. 4.4).

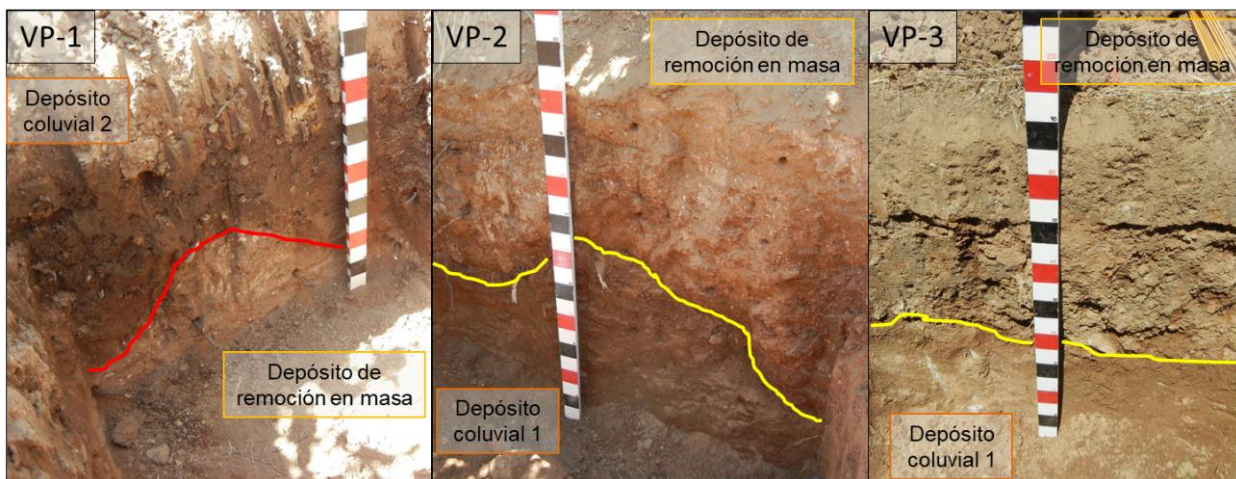


Figura 4.3 Calicatas VP-1, VP-2 y VP-3, mostrando la secuencia de Depósito coluvial 1, Depósito de remoción masa y Depósito coluvial 2. Cuartel Piedemonte, viña de Casablanca.

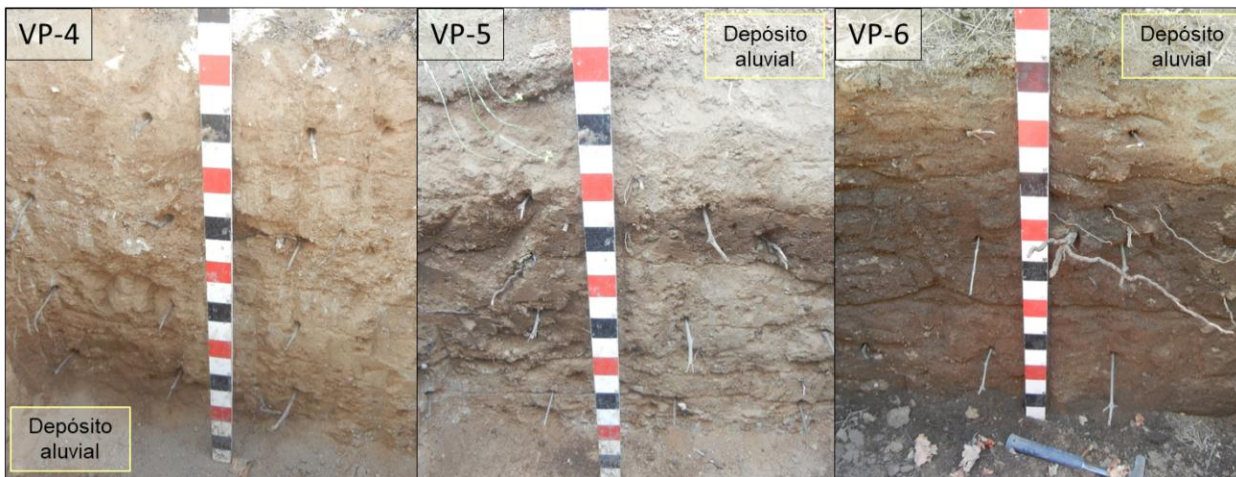


Figura 4.4 Calicatas VP-4, VP-5 y VP-6, suelo formado a partir de un Depósito aluvial. Cuartel Piedemonte, viña de Casablanca.

#### 4.4.1.2 Cuartel Cerro (VC), Casablanca

El cuartel Cerro (VC) se ubica sobre un cerro isla de 10 a 15 m de altura y ocupa una superficie aproximada de 3,8 ha (Fig. 4.5). Este cuartel posee distintas exposiciones al sol. Las calicatas VC-10 y VC-11 tienen exposición hacia el sur y se posicionan sobre pendientes fuertes de aproximadamente 8°; las calicatas VC-7, VC-8 y VC-9 representan al suelo que se expone



hacia el norte y se ubican sobre pendientes moderadas de 2 a 6°; finalmente la calicata VC-12 se ubica en la cima del cerro sobre una pendiente plana. Los perfiles de suelo estudiados presentan profundidades de 75 a 93 cm.

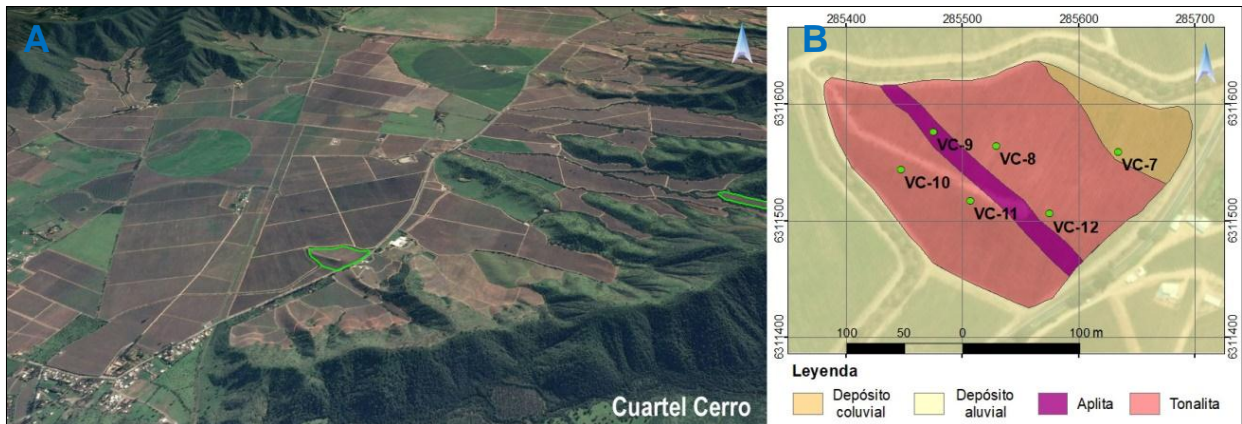


Figura 4.5 Cuartel Cerro de la viña de Casablanca (A) Contexto geomorfológico del cuartel. Imagen obtenida desde Google Earth. (B) Mapa geológico a escala cuartel.

En este cuartel, el suelo está desarrollado directamente sobre la roca, la que corresponde a una Tonalita de biotita y hornblenda de grano medio a grueso (Contreras 2017), observada en las calicatas VC-8, VC-10, VC-11 y VC-12 (Fig. 4.6), y también a una Aplita de turmalina (Contreras 2017) reconocida en la calicata VC-9 (Fig. 4.7A). Esta roca es parte de un dique de al menos 1,5 m de potencia, que se orienta con rumbo NW-SE e intruye a la tonalita (Fig. 4.5B); particularmente el material parental de la calicata VC-7 es un depósito coluvial, compuesto por suelo erosionado desde las partes altas del cerro (Fig. 4.7B).

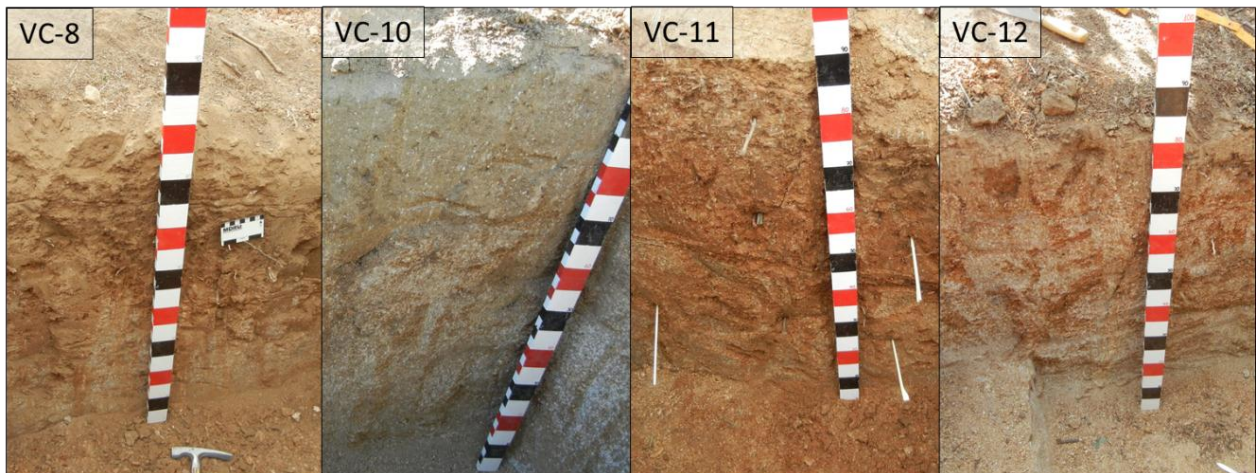


Figura 4.6 Calicatas VC-8, VC-10, VC-11 y VC-12, suelo formado directamente sobre la roca (tonalita). Cuartel Cerro, viña de Casablanca.





Figura 4.7 (A) Calicata VC-9, suelo formado directamente sobre un dique alúvico. (B) Calicata VC-7, suelo sobre depósito coluvial compuesto por suelo erosionado. Cuartel Cerro, viña de Casablanca

#### 4.4.2 FISICOQUIMICA DE SUELOS EN CASABLANCA

Los estadígrafos básicos de los parámetros fisicoquímicos medidos en los suelos de Casablanca en las cuatro temporadas, se presentan en la Tabla 4.3. Además los promedios de las cuatro mediciones realizadas en cada horizonte de las trece calicatas analizadas se exponen en la Tabla A4.6 (Anexos).

Tabla 4.3 Estadísticas básicas de las condiciones fisicoquímicas del suelo medida en cuatro temporadas en la viña de Casablanca.

Viña		pH	CE mS/cm	T° °C	Eh mV	Estadística	pH	CE mS/cm	T° °C	Eh mV	
Casablanca	Invierno 2014	nd	0,18	11,8	nd	Promedio	6,89	0,23	12,1	266	Invierno 2015
		nd	0,90	20,2	nd	Máximo	8,05	1,11	16,5	347	
		nd	0,00	6,1	nd	Mínimo	5,18	0	8,9	160	
		nd	0,16	3,1	nd	Desv. est.	0,52	0,24	1,7	52,3	
		0	144	144	0	<i>n</i>	158	158	158	39	
	Verano 2015	6,47	0,05	22,8	nd	Promedio	6,64	0,05	21,9	269	Verano 2016
		7,55	0,72	31,2	nd	Máximo	7,94	0,4	29,7	331	
		5,22	0,00	17,6	nd	Mínimo	5,14	0	16,7	227	
		0,42	0,10	3,4	nd	Desv. est.	0,56	0,07	2,8	23,9	
		147	148	148	0	<i>n</i>	160	160	160	40	

Las mediciones de pH se realizaron en las temporadas Verano 2015 (V15), Invierno 2015 (I15) y Verano 2016 (V16). Los datos de Invierno 2014 (I14) no pudieron ser medidos por fallas con el equipo, sin embargo, mediciones en solución en esta temporada, indican valores de pH entre 5,26 y 8,38, con un promedio de 7,09. En cuanto a las mediciones *insitu*, se determina que los valores medios de pH medidos en ambos veranos son menores a los del I15 ( $\bar{x}_{I15}=6,89$ ) y el valor de pH promedio medido en V15 ( $\bar{x}_{V15}=6,47$ ) es relativamente menor al promedio medido en V16 ( $\bar{x}_{V16}=6,64$ ) (Figs. 4.8A y 4.8B).

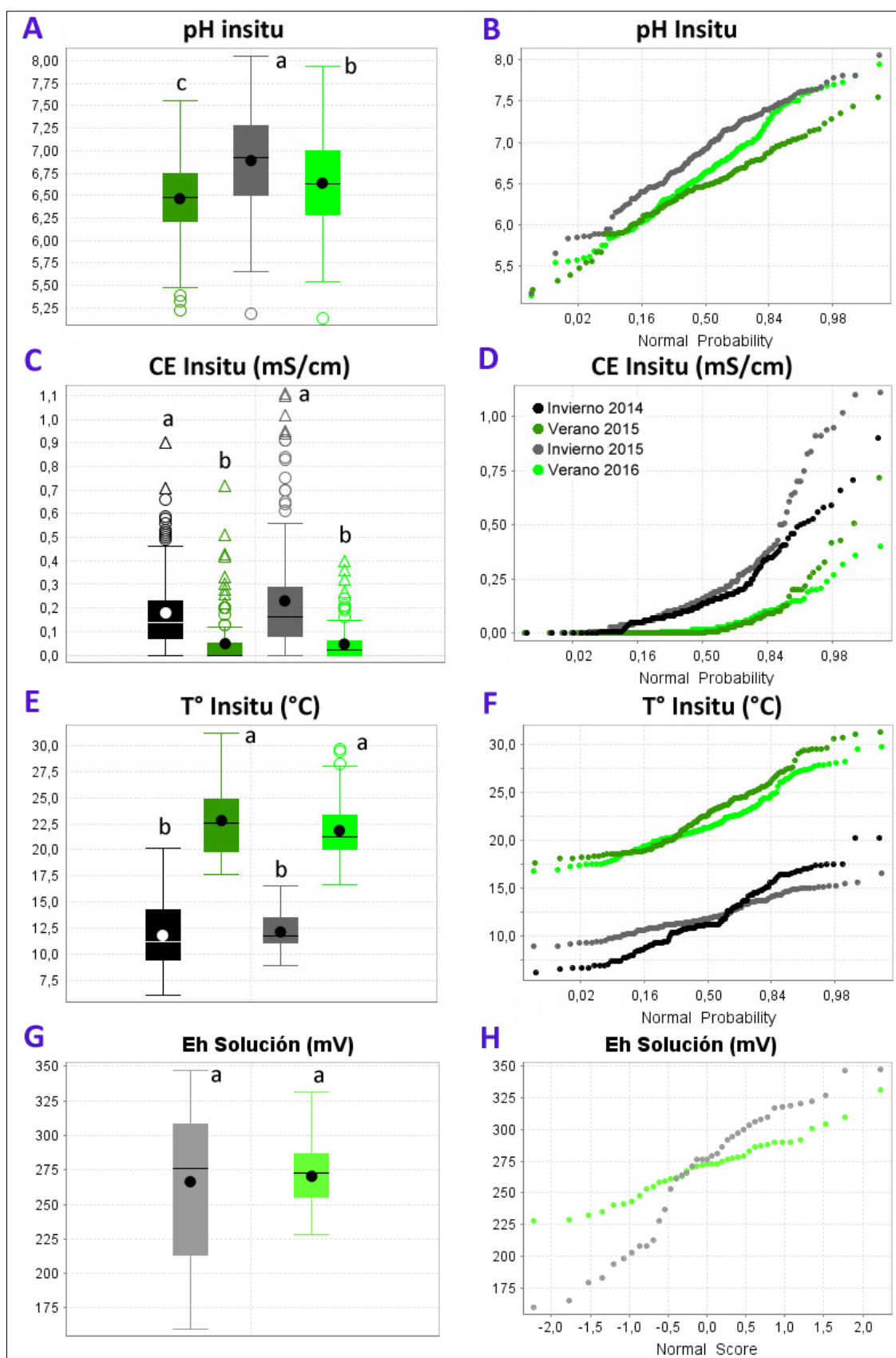


Figura 4.8 Gráficos de caja y de probabilidad con los parámetros fisicoquímicos medidos en las cuatro temporadas en la viña de Casablanca. (A-B): pH. (C-D): CE. (E-F): T°. (G-H): Eh. Letras sobre cada barra indican diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza  $p < 0.05$ .

Los parámetros CE y T° fueron medidos en las cuatro temporadas. Comparativamente los promedios de CE registrados en invierno son superiores a los valores medios de los veranos (Figs. 4.8C y 4.8D), siendo en I15 ( $\bar{x}_{I15}=0,23$  mS/cm) en donde se mide la mayor CE promedio de todas las temporadas, influenciado por un alto número de mediciones sobre 0,75 mS/cm (Fig. 4.8D). Esto es coincidente con el hecho de que en I15 (146,2 mm), la suma de precipitaciones en el mes de trabajo, fue casi tres veces superior que en I14 (51,2 mm).

Por otra parte, las mayores temperaturas medias del suelo se miden en V15 ( $\bar{x}_{V15}=22,8^{\circ}\text{C}$ ), aunque como es esperable, las temperaturas de verano ( $\bar{x}_{V16}=21,9^{\circ}\text{C}$ ) siempre son mayores a las de invierno, por su parte las temperaturas de ambos inviernos son comparables entre sí ( $\bar{x}_{I14}=11,8^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{x}_{I15}=12,1^{\circ}\text{C}$ ) (Fig. 4.8E y 4.8F).

Las mediciones del potencial de óxido reducción (Eh) se realizaron en las temporadas I15 y V16. En ambas temporadas los valores promedios de Eh son estadísticamente comparables ( $\bar{x}_{I15}=+266$  mV;  $\bar{x}_{V16}=+269$  mV), aun cuando el Eh medido en I15 presenta mayor variabilidad de datos, con valores máximo y mínimo más extremos que los medidos en V16 (Fig. 4.8G y 4.8H).

#### 4.4.3 GEOQUÍMICA DE LOS SUELOS DE CASABLANCA

La geoquímica de los suelos cultivados de Casablanca se presenta según los materiales parentales: Depósito de Remoción en masa (n=8) y Depósito Aluvial (n=9) del cuartel Piedemonte (VP) y Tonalita (n=11), Aplita (n=3) y Depósito Coluvial (n=3) del cuartel Cerro (VC). Además se considera el Suelo no cultivado (n=3) localizado en el cuartel Piedemonte (VP), cuyo material parental corresponde al Depósito de Remoción en masa.

Cabe recordar que los depósitos de remoción en masa, aluvial y coluvial descritos en el levantamiento geo-pedogenético como materiales parentales son de tipo monomítico, es decir, los clastos y el material fino tiene origen en la roca parental tonalita, con un porcentaje menor (<5%) de clastos de aplita, reconocidos en algunos perfiles de suelo.

##### 4.4.3.1 Nutrientes en suelo total en Casablanca

Las estadísticas básicas de las concentraciones en suelo total de 11 nutrientes y Ti en la viña de Casablanca se exponen en la tabla A4.7 (Anexos) y en los gráficos de caja de la figura 4.9.

En las cajas de color calipso se muestra la distribución estadística de los contenidos de nutrientes medidos en el suelo no cultivado. Cabe destacar que las concentraciones de elementos relativamente inmóviles como Al, Ti y Mn son mayores en el suelo no cultivado en

comparación a todos los suelos cultivados en estudio, además presenta contenidos promedios relativamente mayores en los elementos P, K, Ca, Mg, Fe y Zn (Fig. 4.9).

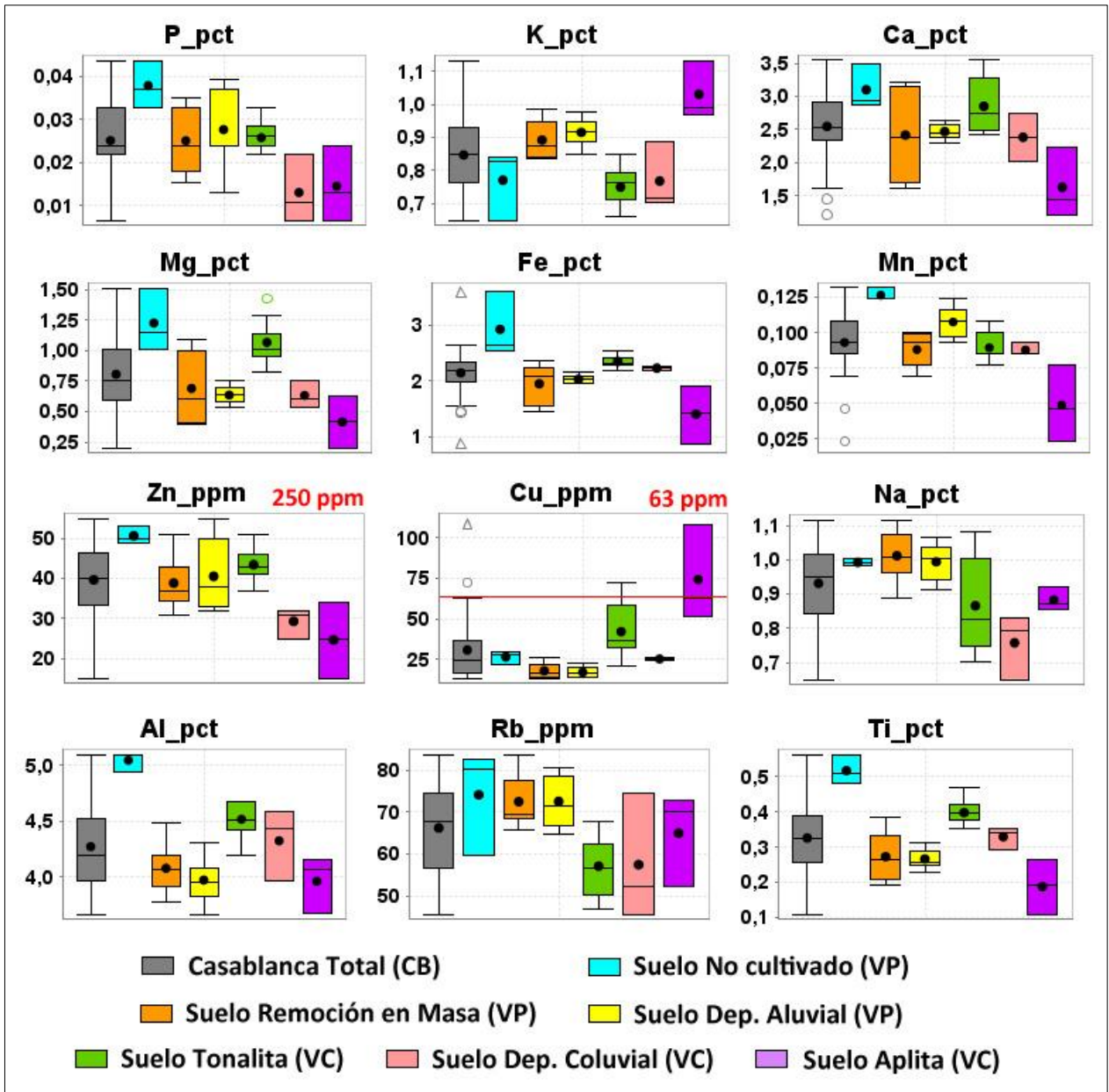


Figura 4.9 Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes en suelo total de los materiales parentales muestreados en Casablanca. Valores en rojo límite en suelos CCME (2016).

En cuanto a los suelos cultivados, se reconocen diferencias entre suelos de diferente material parental para todos los nutrientes analizados, destacando distribuciones particulares para el suelo desarrollado sobre la Aplita (VC-9), los cuales muestran las concentraciones más altas de K y Cu y los más bajos valores de Mn, Ti, Fe, Ca, Zn y Mg (cajas violetas en Fig. 4.9), marcando la diferencia de esta litología respecto a la tonalita (cajas verdes), reconocida como la roca parental del resto de suelos. Cabe destacar que estos suelos desarrollados directamente



sobre la roca, tanto Tonalita como Aplita, presentan mayores concentraciones de Cu que los suelos desarrollados sobre material transportado (Fig. 4.9).

Se destaca, por otra parte, similares valores para todos los nutrientes se reportan en los suelos derivados del Depósito de remoción en masa (cajas naranjas) y en los suelos del Depósito aluvial (cajas amarillas), solamente Mn es levemente superior en los suelos aluviales (Fig. 4.9).

#### **4.4.3.2 Nutrientes en la fase biodisponible del suelo en Casablanca**

Las estadísticas básicas de la concentración en la fase biodisponible de los suelos para diez nutrientes más Ti, medidos en los veranos 2015 (V15) y 2016 (V16) se presentan en la Tabla A4.5 (Anexos). La distribución estadística se representa a través de gráficos de caja (Fig. 4.10). Cabe destacar que el nutriente Na no se analiza por la técnica MMI.

Los resultados indican que los suelos no cultivados (cajas calipso tachadas) muestran distribuciones estadísticas acotadas respecto a distribuciones con mayor variabilidad medidas en los suelos cultivados en ambas temporadas de muestreo. Sólo para Mn y Rb los suelos no cultivados poseen una variabilidad similar a la de los suelos cultivados.

Los elementos K, Ca, Mg, Fe, Mn y Zn en el suelo blanco (no cultivado) presentan valores medios cercanos al promedio y a la mediana del total de los datos, representado por la caja color gris (Fig. 4.10); sin embargo, las concentraciones medias de los nutrientes P y Zn en los suelos no cultivados tienen promedios, en general, más bajos que los suelos cultivados (Fig. 4.10).

Por otra parte, al igual que en la química total, el suelo “aplítico” (cajas violeta) muestra mayores promedios comparativos, respecto a los demás suelos, para K ( $\bar{x}_{V15}= 160$  ppm;  $\bar{x}_{V16}= 115$  ppm) y Cu ( $\bar{x}_{V15}= 3,01$  ppm;  $\bar{x}_{V16}= 1,93$  ppm) en la fase biodisponible en ambos años de medición, pero principalmente en la temporada V15. También se reconocen altos valores comparativos en los suelos de Aplita para Rb, Al y P (Fig. 4.10).

Otras diferencias en la distribución de los nutrientes en fase biodisponible, se reconocen en los suelos desarrollados directamente sobre la roca Tonalita (cajas verdes), tienen altas concentraciones comparadas a los otros suelos en los elementos Ca y Mg y los más bajos promedios comparativos en P, K, Zn y Fe (Fig. 4.10). Mayores valores de Fe y Al, aunque con alta variabilidad, se miden en los suelos aluviales en la temporada V16 (cajas amarilla tachadas), de la misma forma, que para P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Al en el suelo coluvial de cuartel cerro (cajas rosada tachadas).

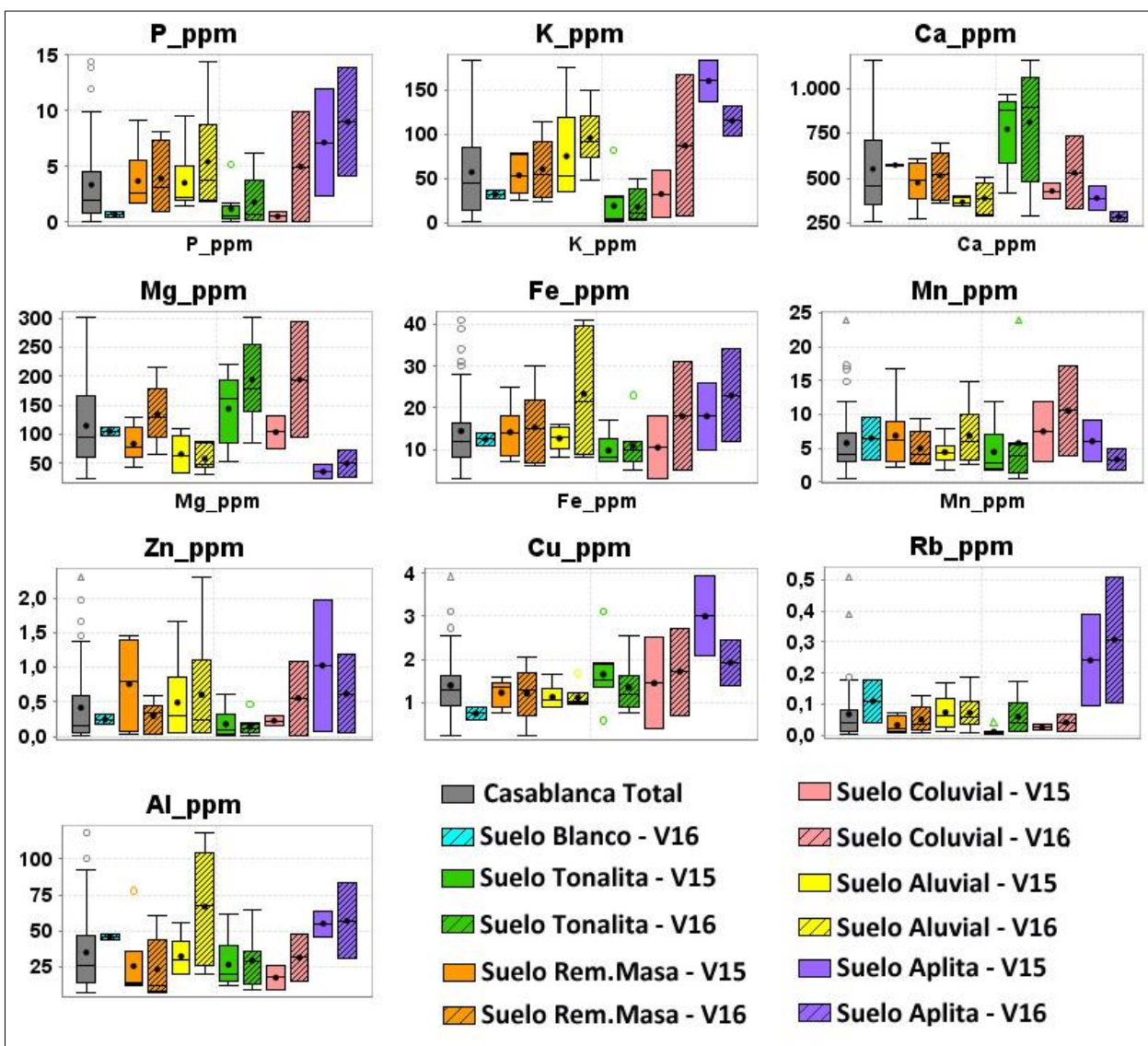


Figura 4.10 Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes en la fase biodisponible del suelo en los diferentes materiales parentales muestreados en Casablanca. Suelo Aluvial, Suelo Rem. Masa y Suelo Blanco (Cuartel Piedemonte o VP). Suelo Tonalita, Suelo Coluvial y Suelo Aplita (Cuartel Cerro o VC).

Por último, aun cuando existen diferencias entre los suelos desarrollados sobre distintos materiales parentales, no se observan notorias diferencias entre los dos cuarteles en estudio, a excepción de promedios más bajos y una distribución estadística con menor variabilidad para Cu en el cuartel Piedemonte (VP), respecto al cuartel Cerro (VC).

#### 4.4.3.3 Metales en suelo total en Casablanca

Las estadísticas básicas de las concentraciones de metales en el suelo total se presentan en la Tabla A4.9 (Anexos). La distribución estadística se grafica en diagramas de caja (Fig. 4.11) para los metales con suficiente respuesta analítica (Cd, Ni, Pb, As, Mo, Hg y Au). Los resultados

muestran que en los suelos de Casablanca todos los metales se encuentran bajo los límites determinados en la Norma canadiense, excepto para el caso del Cu en los suelos aplíticos (Fig. 4.9).

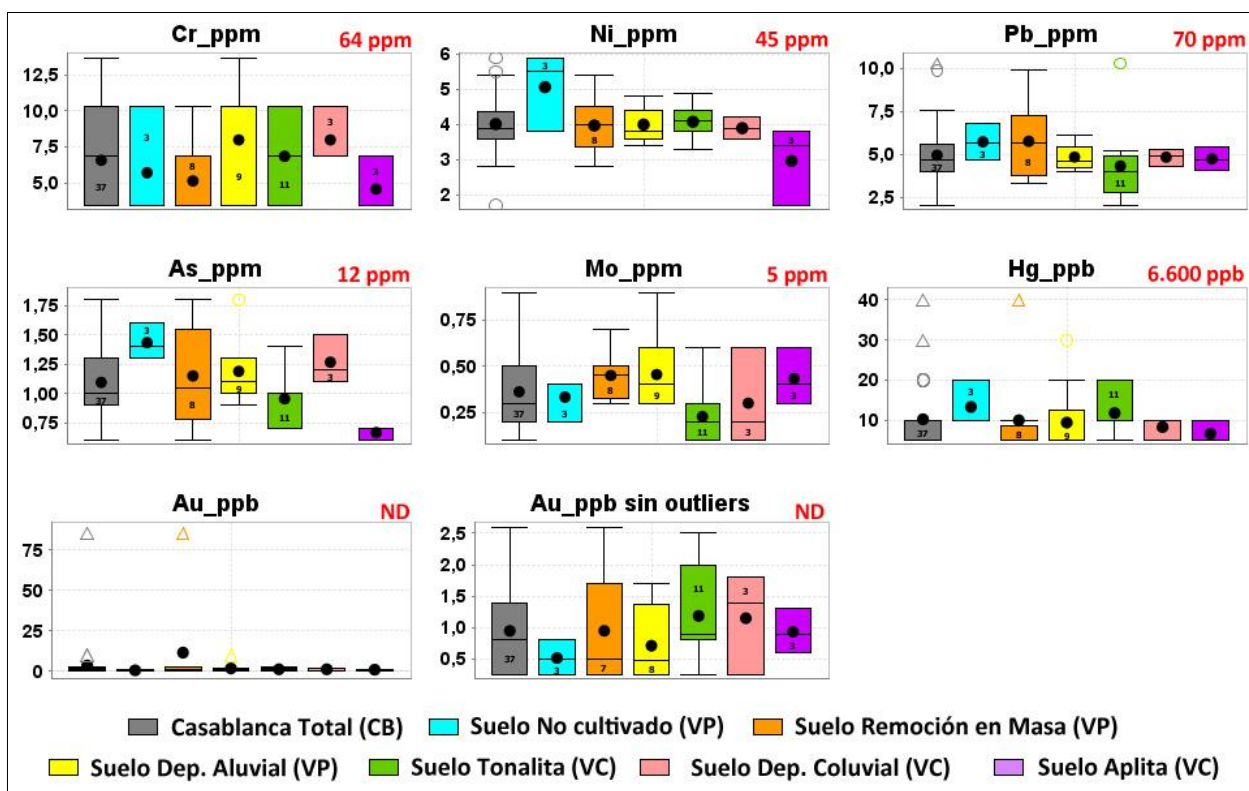


Figura 4.11 Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en suelo total de los materiales parentales muestreados en Casablanca. Valores en rojo límite en suelos CCME (2016).

En cuanto a la distribución de estos elementos se observa que, en general, los valores no varían significativamente entre suelos de diferente material parental o cuartel. Sin embargo, metales como Ni, As y Hg presentan promedios comparativamente más altos en los suelos no cultivados (cajas calipso), respecto de los demás suelos cultivados. Por otra parte, los suelos desarrollados sobre Aplita (cajas violetas) poseen los más bajos promedios en los metales Ni y As. Para Au, a pesar de mostrar valores *outliers* en los suelos de remoción en masa (85,2 ppb, triángulo naranja) y en el suelo aluvial (9,9 ppb, triángulo amarillo), excluyendo a estos datos, los contenidos de Au en los suelos no superan los 3 ppb. Finalmente se destaca una baja resolución analítica en las mediciones de Cr (Fig. 4.11).

#### 4.4.3. 4 Metales en la fase biodisponible del suelo en Casablanca

Los resultados del contenido de metales en la fase biodisponibles de los suelos se presentan, para cada tipo de suelo de la viña de Casablanca, por medio de los estadígrafos básicos en la Tabla A4.10 (Anexos) y de la distribución estadística en los gráficos de caja (Fig. 4.12).

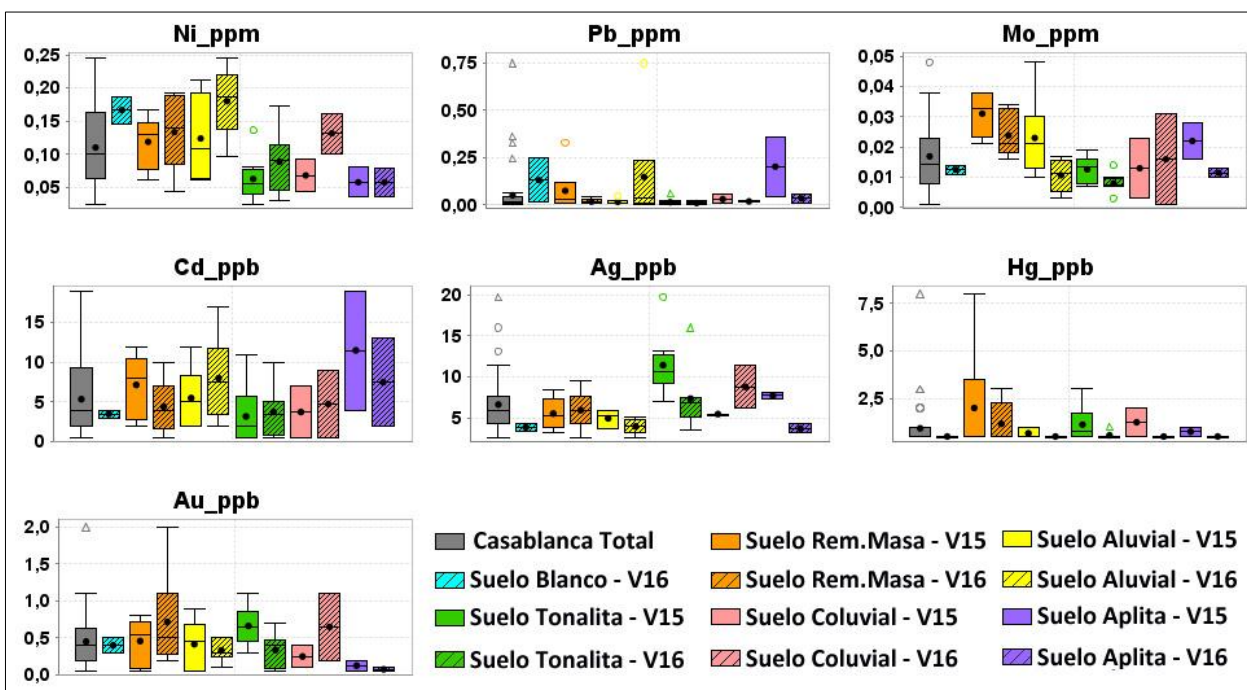


Figura 4.12 Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en la fase biodisponible del suelo en los diferentes materiales parentales muestreados en Casablanca. Suelo Aluvial, Suelo Rem. Masa y Suelo Blanco (Cuartel Piedemonte o VP). Suelo Tonalita, Suelo Coluvial y Suelo Aplita (Cuartel Cerro o VC).

Al igual que para los nutrientes, los metales Mo, Cd, Ag, Hg y Au, medidos en la fase biodisponible del suelo no cultivado, presentan rangos (valor máximo menos valor mínimo) más acotados que los suelos cultivados, sólo Ni y Pb muestran una dispersión mayor (Fig. 4.12).

Diferencias entre los cuarteles se observan para Ni, tal que todos los suelos del cuartel Piedemonte (VP) tienen promedios comparativamente mayores a los suelos del cuartel Cerro. Del mismo modo, Ag muestra mayor variabilidad en los suelos del cuartel Cerro, contrastando con más bajos promedios y con menor diferencia entre las temporadas en el cuartel Piedemonte (Fig. 4.12).

Particularmente, Pb posee bajas concentraciones con varios valores outliers, Mo y Hg presentan los mayores promedios en los suelos de remoción (cajas naranjas en Fig.4.12), lo mismo para Cd en los suelos de Aplita (caja violeta). Por último, pocas diferencias se distinguen entre las mediciones de ambas temporadas, sin embargo, algunos patrones se observan para Ni, en donde las concentraciones medias de este metal en la fase biodisponible son mayores, para todos los suelos muestreados, en la temporada V16, mientras que para Hg, se reconocen promedios comparativos más altos en la temporada V15, con muy baja respuesta analítica en el verano 2016.



#### 4.4.4 QUÍMICA DE FRUTOS EN CASABLANCA

La química inorgánica de nutrientes y metales en las bayas de la viña de Casablanca se subdivide en los dos cuarteles en estudio, de este modo, en el cuartel Piedemonte (n=6) se agrupan a los materiales parentales Depósitos de remoción en masa y Depósito aluvial. Por su parte, en el cuartel Cerro (n=6) se consideran los materiales parentales, Tonalita, Depósito coluvial de composición tonalítica y Aplita.

##### 4.4.4.1 Nutrientes en frutos de Casablanca

Los estadígrafos básicos de los contenidos de nutrientes y los grados brix\* (\*Glosario) de las bayas de Casablanca, durante las dos temporadas de medición se encuentran en la Tabla A4.11 (Anexos) y la distribución estadística se observa en la figura 4.13.

Los grados brix medidos en las bayas muestreadas en Casablanca poseen valores medios similares en ambas temporadas en el cuartel Piedemonte (VP) y en la medición del verano 2015 en el cuartel Cerro (VC). Sin embargo, durante la medición V16, el grado brix de las bayas del cuartel Cerro, es en promedio notoriamente inferior (Fig. 4.13).

La abundancia relativa de nutrientes en la bayas de Pinot Noir, es de mayor a menor: K >> Ca>P>Mg>Na >> Fe>Mn>Zn>Rb>Cu >> Al. El K es el elemento más abundante y luego Ca, pero en un orden de magnitud menor, dado por el símbolo ">>", en última instancia Al, es el nutriente menos abundante (Tabla A4.11; Anexos).

Los nutrientes Ca y, en menor medida, K presentan las mayores concentraciones medias en el cuartel Piedemonte (VP), en ambas temporadas (cajas amarillas). Por otra parte, P, Fe, Zn y Na tienen promedios levemente mayores en el cuartel Cerro, pero mientras P, Fe y Zn tienen medias comparativamente mayores en la temporada de medición V15 (cajas sin tachado), Na posee mayores promedios en el verano de 2016 (cajas tachadas, Fig. 4.13).

Los elementos Mg, Mn y Cu muestran variables concentraciones medias en el cuartel Cerro (VC) en las dos temporadas de medición (cajas verdes); mientras Mg y Cu presentan las mayores concentraciones medias en la temporada V16 (cajas verdes tachadas), Mn muestra las menores concentraciones durante el verano 2016. Cabe destacar que los valores medios del cuartel Pendiente (cajas amarillas) y de la temporada V15 del cuartel Cerro (cajas verdes) son relativamente similares (Fig. 4.13).

Finalmente, Al, con respuesta analítica solo en verano 2016, y Rb, medido únicamente en verano 2015, presentan mayores contenidos promedios en el cuartel Cerro (Fig. 4.13).

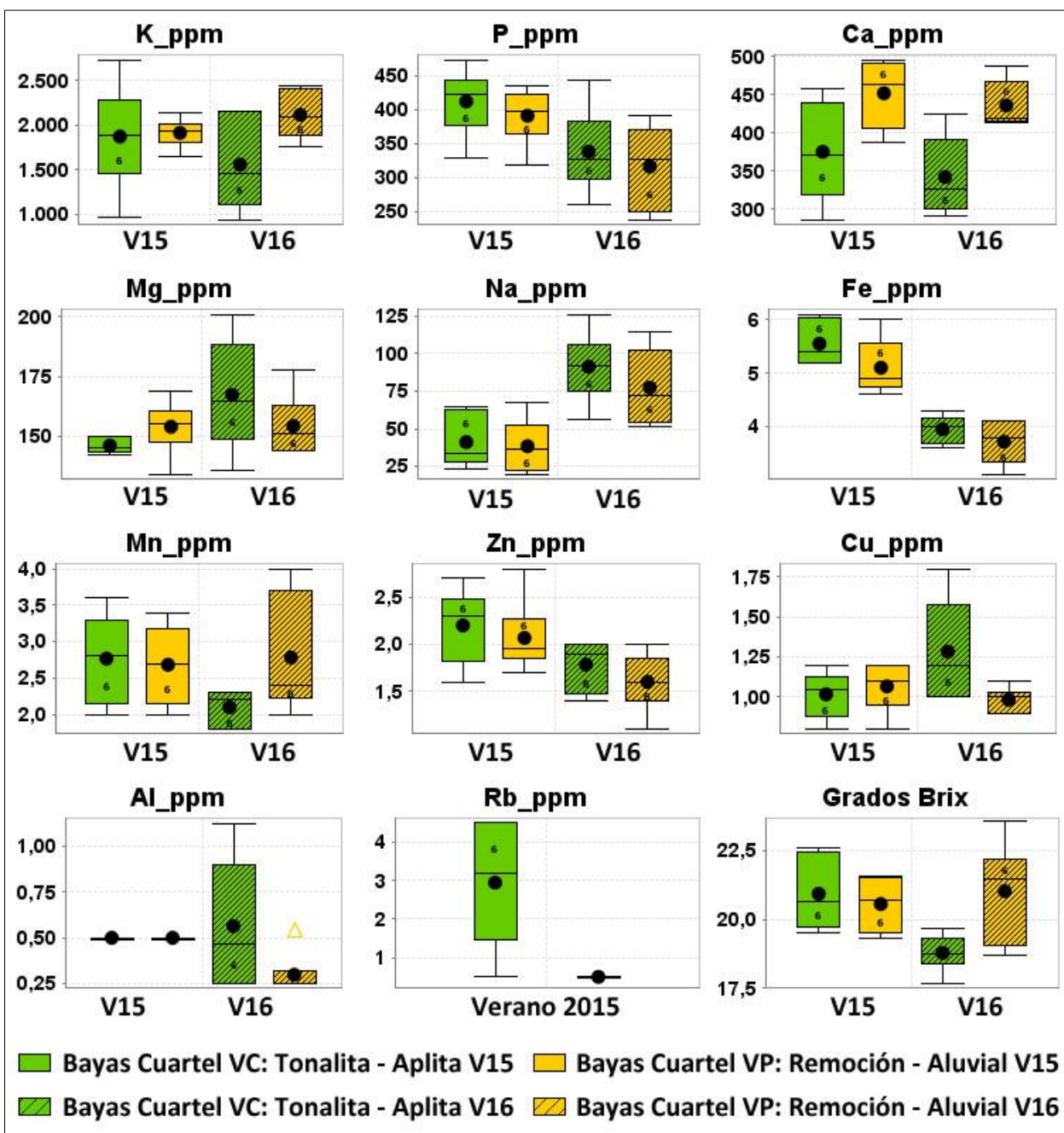


Figura 4.13 Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes y grados brix de los frutos de Casablanca.

#### 4.4.4.2 Metales en frutos en Casablanca

Los resultados del análisis químico de metales en las bayas de Casablanca se presentan por medio de los estadígrafos básicos en la Tabla A4.12 (Anexos), mientras que la distribución estadística es representada en gráficos de caja para los metales con respuesta analítica (Fig. 4.14), los cuales corresponden a Cu, Zn, Cr, Sn.

La abundancia relativa de los elementos considerados, está en el orden de:  $Zn > Cu \approx Sn > Cr$ . Respecto a los límites establecidos en la Legislación chilena para metales, ninguna muestra supera estos valores en las bayas de la viña de Casablanca.

Como ya fue descrito, la distribución de los metales Cu y Zn muestran resultados influenciados por la estacionalidad, con alto rango (valor máximo menos mínimo) y mayores promedios para Cu en las bayas que crecieron en el cuartel Cerro en el verano 2016, mientras que Zn presenta mayores medias en ambos cuarteles en el verano 2015 (Fig.4.14).

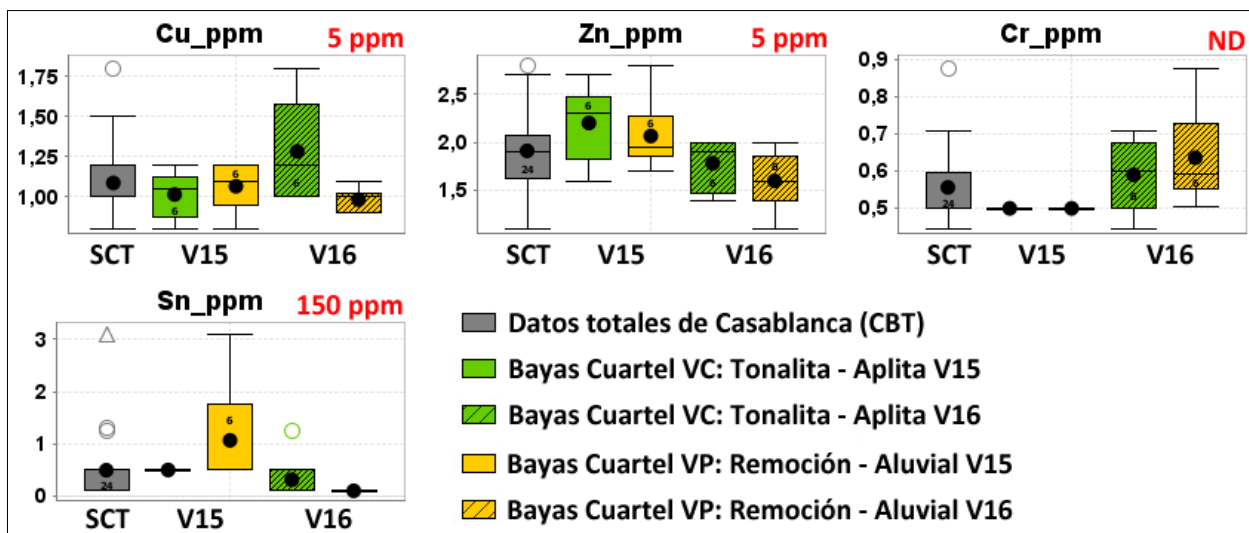


Figura 4.14 Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en los frutos de Casablanca. Valores en rojo corresponden al Reglamento chileno sanitario de los alimentos (1997).

Las mediciones de Cr en el verano 2016, muestra pocas diferencias entre ambos cuarteles, aunque con un valor anómalo en el cuartel Piedemonte (0.88 ppm). Los resultados de Sn en bayas tienen baja confianza en el control de calidad, lo cual que se refleja en sus resultados: altos valores de Sn en cuartel Piedemonte durante la temporada V15, que no se condice con los resultados obtenidos en verano 2016.

#### 4.4.5 HIDROQUÍMICA DE CASABLANCA

En Casablanca se analizan 12 muestras de aguas, correspondientes a agua de lluvia (n=2) y aguas subterráneas (n=2) colectadas en Invierno 2015 y agua de tranque (n=1), agua de riego (n=2) y aguas subterráneas (n=5) muestreadas durante la temporada Verano 2016. La ubicación de las muestras puede verse en la figura A4.1 (Anexos).

Es importante mencionar que durante la colección de aguas lluvias ambas muestras mostraron la presencia de burbujas al ser filtradas, sin embargo, en la muestra RW-V1-I15 esta característica era más evidente. Descartando una contaminación de los materiales de muestreo,

se plantea que el origen de esta espuma podría corresponder a algún agroquímico foliar que fue aplicado en la viña y que afectó mayormente al colector V1.

#### 4.4.5.1 Fisicoquímica de aguas en Casablanca

Los resultados de las mediciones fisicoquímicas de las muestras de agua se detallan en la tabla A4.13 (Anexos), además la distribución de los datos puede observarse comparativamente para todas las muestras de agua en la figura 4.15.

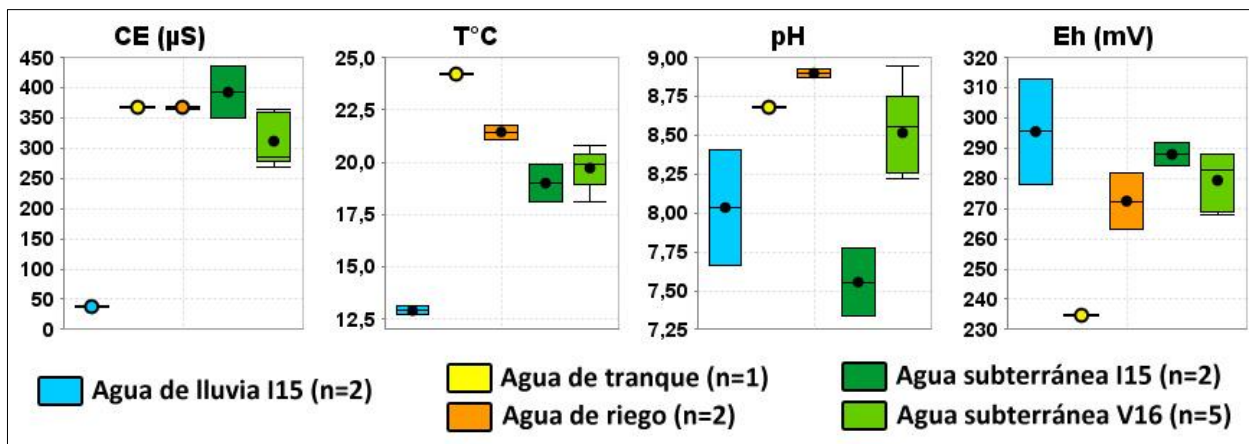


Figura 4.15 Parámetros fisicoquímicos conductividad eléctrica (CE), temperatura (T), pH y potencial de óxido-reducción (Eh) medidos en terreno en las muestras de agua de Casablanca.

El agua de lluvia (cajas celeste; Fig. 4.15) presenta baja conductividad eléctrica ( $\bar{x}_{CE}$ : 38  $\mu$ S), baja temperatura ( $\bar{x}_T$ : 12.9°C) y alta diferencia entre ambas muestras en pH y Eh, marcado por un alto valor de Eh (313 mV) y de pH (8,41) en la muestra RW-V1 (Tabla A.13; Anexos).

La muestra de agua del tranque (círculo amarillo) presenta una conductividad eléctrica (CE) similar al agua de riego (naranja), pero mayores valores de temperatura y relativamente menor pH, aun cuando ambas matrices poseen condiciones más básicas, respecto a las aguas subterráneas y de lluvia (Fig. 4.15). Destaca el bajo potencial de óxido-reducción en la muestra de tranque (Eh: +235 mV) en relación al resto de muestras de agua.

Las aguas subterráneas presentan notorias diferencias en pH entre ambas temporadas, con valores más alcalinos medidos en la temporada Verano 2016. Además leves diferencias para CE y Eh entre las estaciones, con CE y Eh menor en verano y sin cambios considerables en la temperatura de las aguas subterráneas entre invierno y verano.



#### 4.4.5.2 Nutrientes en aguas de Casablanca

Los contenidos de nutrientes medidos en las distintas matrices de agua se exponen en la tabla A4.13 (Anexos), adicionalmente estos valores son graficados en escala logarítmica en la figura 4.16. Particularmente el elemento Fe no presenta respuesta analítica en ninguna muestra.

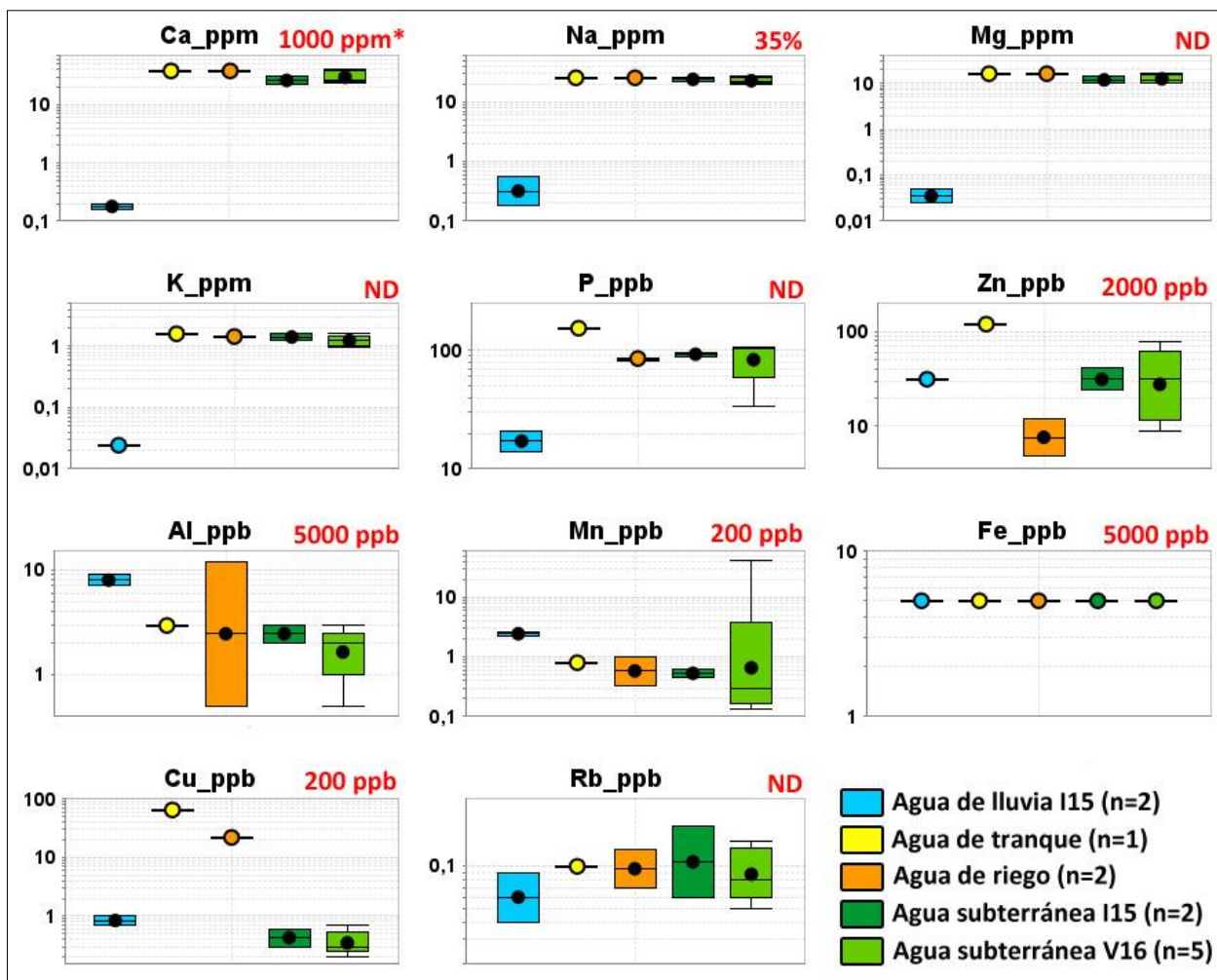


Figura 4.16. Contenidos de nutrientes en escala logarítmica en las muestras de aguas de Casablanca. Valores en rojo corresponden a la Norma chilena N°1333 para aguas de riego (1978).

Los contenidos de Fe, Mn, Zn, Cu, Na y Al son comparados con la Norma chilena para aguas de riego y todos los valores se encuentran en concentraciones bajo la norma (Tabla A4.13).

El agua de lluvia presenta los más bajos contenidos de Ca, Na, Mg, K, P y Rb, sin embargo, muestra valores de Zn y Cu levemente mayores a las aguas subterráneas, e incluso, los contenidos de Al y Mn son mayores a todas las muestras de aguas analizadas (Fig. 4.16). Cabe destacar que el contenido de Zn de la muestra RW-V1 (722.6 ppb) se considera como un valor anómalo y se elimina de la base de datos de nutrientes.

El agua de tranque, respecto a las otras matrices de agua, presenta las más altas concentraciones de P, Zn, Cu, K, Na y Ca. Además en conjunto con el agua de riego, muestran en general, mayores concentraciones en Ca, Na, Mg y Cu. Particularmente, las aguas de riego poseen los más bajos valores promedios de Zn y un alto contraste en el contenido de Al de las dos muestras (Fig. 4.16).

Para las aguas subterráneas se tienen valores similares de nutrientes en ambas estaciones de muestreo, sólo se reconocen leves diferencias poco significativas, tales como mayor promedio para los elementos P, K, Cu, Na, Al y Rb en la temporada Invierno 2015 y mayores valores medios de Ca, Mg, Zn y Mn, en las muestras del Verano 2016. Sin embargo, para el caso de Mn, el mayor promedio está dado por un valor alto de Mn (42.6 ppb) en la muestra GW-V2, mientras que el resto de los datos fluctúan entre 0.13 y 0.34 ppb de Mn (Tabla A4.14; Anexos).

#### 4.4.5.3 Metales en aguas de Casablanca

Las concentraciones de metales en las aguas muestreadas en Casablanca se presentan en la tabla A4.14 (Anexos). Además la distribución de los datos se muestra en la figura 4.17). Los elementos As, Ni y Au poseen todos los resultados bajo el límite de detección, mientras que los metales Cd, Pb y Sb presentan respuesta analítica sólo en la temporada I15.

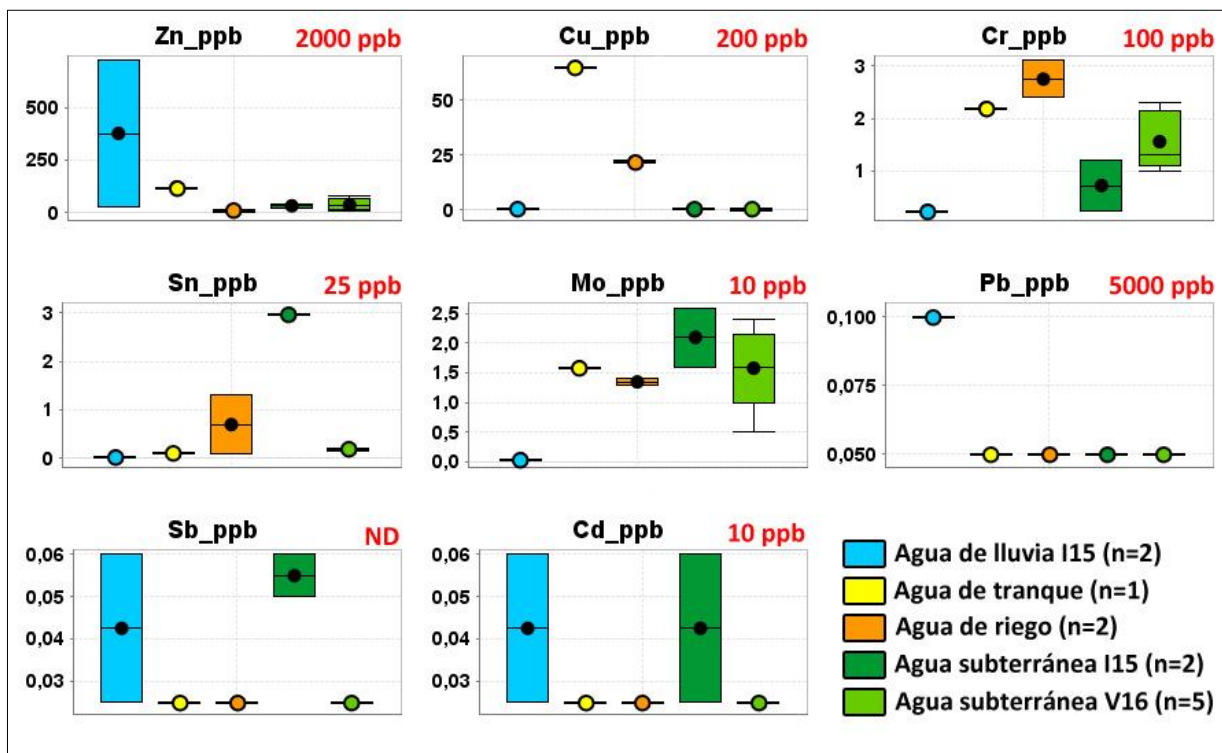


Figura 4.17. Contenidos de metales en las muestras de aguas de Casablanca. Valores en rojo corresponden a la Norma chilena N°1333 para aguas de riego (1978).

Al ser comparados con la Norma para agua de riego, todos los valores de agua de Casablanca están bajo los límites establecidos (Tabla A4.14; Anexos).

Las dos muestras de aguas de lluvia presentan respuesta analítica para Zn, Cu y Pb. Particularmente la muestra RW-V1 tiene respuesta analítica para Sn y la muestra RW-V2 para Cd y Sb, pero mostrando muy bajas concentraciones. En el caso del Zn, éste posee la muestra anómala de 722.6 ppb, por lo tanto, el agua de lluvia muestra valores altamente contrastantes. Para el Cu, el agua de lluvia tiene contenidos levemente más altos que el agua subterránea y considerablemente más bajos que el agua de riego y de tranque. En cuanto al Pb, éste sólo tiene respuesta analítica en las muestras de agua de lluvia, aunque su concentración es muy baja (0,1 ppb).

Las aguas de tranque y riego presentan respuesta analítica para Zn, Cu, Cr, Sn y Mo. Los contenidos de Cu y Cr son mayores en estas aguas, respecto a las otras matrices de aguas en estudio, particularmente Cr es mayor en el agua de riego, mientras que Cu es considerablemente más alto en el agua de tranque.

Finalmente, las aguas subterráneas de ambas estaciones presentan respuesta analítica para Zn, Cu, Cr, Sn y Mo, además en el invierno 2015, estas aguas muestran respuesta para Sb y Cd, pero en muy bajas concentraciones. En general, las aguas subterráneas tienen las mayores concentraciones de Mo y las menores concentraciones de Cu y Cr, respecto al resto de aguas analizadas. Diferencias entre temporadas se reconocen en una mayor concentración de Cr en las aguas muestreadas en verano 2016, mientras que mayor Sn y Mo, se midió en invierno 2015, destacando que en estas aguas la concentración de Sn supera considerablemente al del resto de matrices de aguas.

#### **4.4.6 PERFILES DE SUELOS SELECCIONADOS EN CASABLANCA**

En Casablanca se seleccionan las calicatas VP-2, VP-6 y la calicata blanco VP-13 en el cuartel Piedemonte y los perfiles VC-7, VC-9 y VC-11 del cuartel Cerro (Fig. 4.18). Adicionalmente, la calicata VP-3 es considerada en los análisis químicos y físicos de suelo.

##### ***4.4.6.1 Mineralogía en roca y fracción limo-arcilla en suelos de Casablanca***

La mineralogía de las rocas parentales y los suelos seleccionados de Casablanca se determina mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) en la fracción limo-arcilla para el caso de los suelos y en la fracción pulverizada (<74 µm) de la roca. Los resultados se presentan en la tabla A4.15, en la figura 4.19 para las rocas y en la figura 4.20 para los suelos.

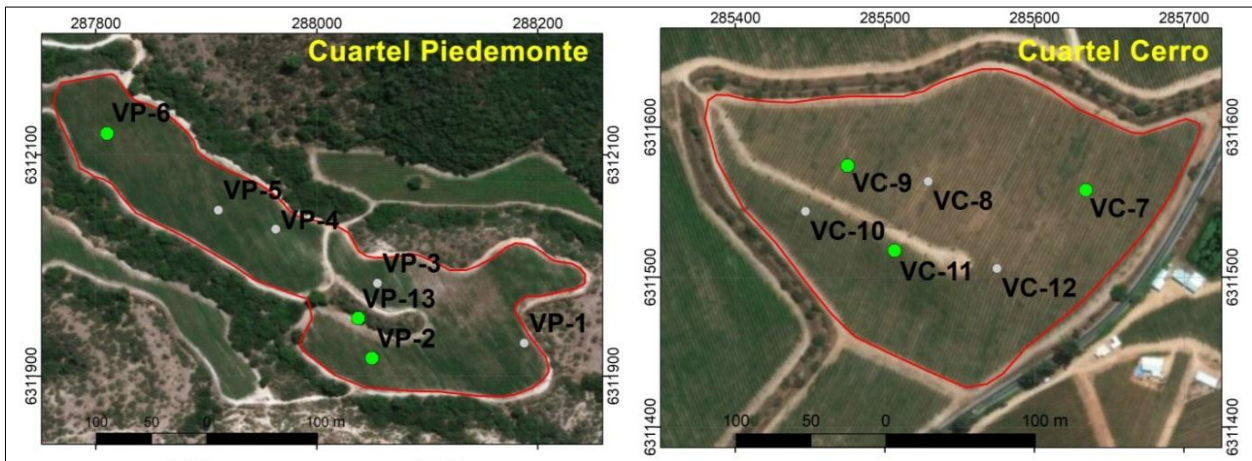


Figura 4.18. Ubicación de calicatas seleccionadas (puntos verdes) en la viña de Casablanca.

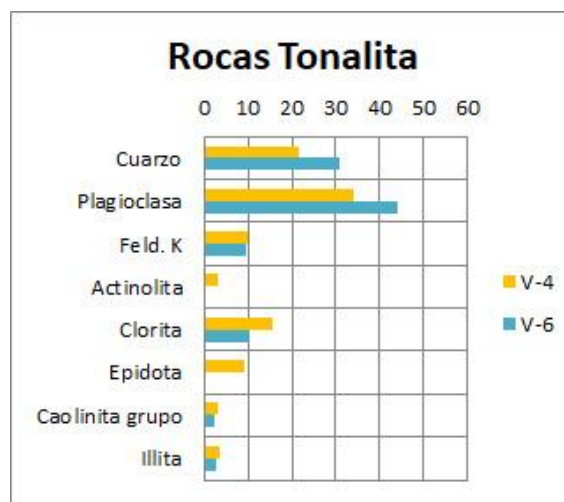


Figura 4.19. Gráfico de barra con la mineralogía de las rocas Tonalita de Casablanca.

Para suelos y roca el mineral más abundante es plagioclasa (Pg), el segundo mineral en abundancia en la roca es cuarzo (Qz), pero esto no se repite en todos los suelos. La roca además presenta porcentajes cercanos a 10% de feldespato potásico (Feld. K) y clorita (Chl), este último mineral no fue reconocido en los suelos. En la muestra V-4 se determina la presencia de actinolita (Act) y epidota (Ep). Ambas rocas además presentan contenidos menores a 5% de arcillas del grupo de la caolinita (Cao) e illita (Fig. 4.19).

Los suelos cultivados del cuartel Piedemonte (Fig. 4.20), muestran la misma mineralogía en similares proporciones, con una abundancia relativa que va desde  $Pg > Qz \approx$  arcillas del grupo de la illita (Ill)  $> Cao \approx Act > Feld. K$ . Del mismo modo, el perfil de suelo no cultivado de este cuartel (VP-13) tiene los mismos minerales, pero además presenta en todos los horizontes un porcentaje cercano al 5% de Ep y menores proporciones de turmalina (Tur), arcillas del grupo de la esmectita (Esm) y óxidos de Fe (hematita). En los horizontes A y B de este suelo, también se reconoce el mineral cumingtonita (Cum), que corresponde a un mineral del grupo de los



anfíboles que se forma por metamorfismo regional, comúnmente asociado a hornblendas (Deer *et al.* 1992).

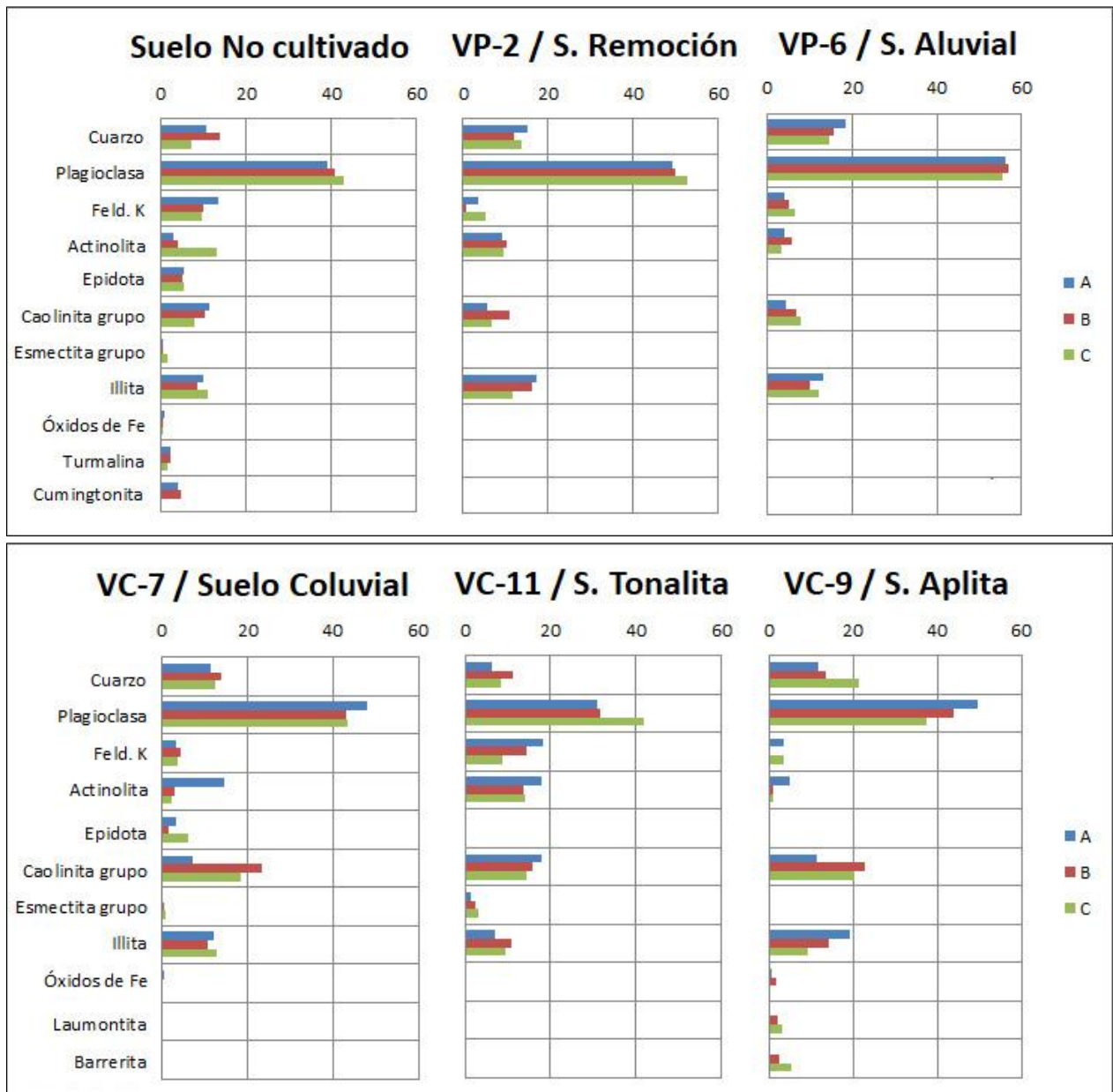


Figura 4.20. Gráficos de barra con la mineralogía presente en los horizontes A, B y C de los perfiles de suelos seleccionados de Casablanca: (arriba) VP-13 (No cultivado), VP-2 y VP-6 del cuartel Piedemonte; (abajo) VC-7, VC-11 y VC-9 del cuartel Cerro.

En el cuartel Cerro, el perfil de suelo desarrollado directamente sobre la Tonalita (VC-11) muestra similar mineralogía respecto a la roca parental, aunque con ausencia de Chl y Ep y con un aumento en la proporción de arcillas, tanto del grupo de la illita, como de la caolinita, con la existencia de arcillas del grupo de la esmectita. Por su parte, el suelo coluvial de composición monomítica (tonalítica) muestra un alto porcentaje de Cao, especialmente en los horizonte B y



C y menor proporción de esmectita, en relación al suelo tonalítico (VC-11), así como también se reconoce la ocurrencia de Ep, en todos los horizontes, y trazas de óxido de Fe (goethita) en el horizonte A (Fig. 4.20).

Por otro lado, el suelo desarrollado sobre la roca Aplita (VC-9), presenta una mineralogía algo diferente (Fig. 4.20), con un porcentaje cercano al 40% de Pg y contenidos entre 10 a 20% de Cao, Illi y Qz y con bajas proporciones (< 5%) de Feld. K, Act y óxidos de Fe (magnetita). Además en los horizontes B y C se observa un porcentaje entre 5 a 2% de los minerales laumontita (Lau) y barrerita (Barr), los cuales forman parte del grupo de las zeolitas. Particularmente Lau es una zeolita de calcio que se puede formar a partir de plagioclasas cálcicas, durante el metamorfismo de bajo grado (Deer *et al.* 1992).

#### **4.4.6.2 Mineralogía de arcillas en Casablanca**

La caracterización mineralógica de arcillas (filosilicatos) se realiza para la fracción arcilla de los suelos y en la fracción <74  $\mu\text{m}$  de la roca pulverizada. Los resultados son presentados en la tabla A4.16 (Anexos) y en la figura 4.21 a través de gráficos de barra.

Los minerales de arcillas que fueron reconocidos en las rocas parentales corresponden a una alta abundancia de Cao, luego de Chl y un menor contenido de Illi (Tabla A4.16). En todos los suelos, si bien se reconoce la presencia de Cao e Illi, no se identifica Chl (Fig. 4.21), al igual que lo observado para la mineralogía limo-arcilla.

En los perfiles de remoción en masa seleccionados en el cuartel Piedemonte, se registra en el suelo no cultivado (VP-13) la presencia de 2 a 4% vermiculita (Verm) en todos los horizontes, mientras que en el suelo cultivado (VP-2), se determina la existencia de un 3% de Esm en el horizonte B (Fig. 4.21). Por el contrario, en el suelo desarrollado sobre el depósito aluvial (VP-6) sólo se reconocen las arcillas Illi y Cao en porcentajes similares (4 a 7%) en los tres horizontes.

En el caso del suelo desarrollado sobre la tonalita (VC-11) en el cuartel Cerro, se reconoce una alta proporción de caolinita (13-14%) en los horizontes A y B, mientras que un menor porcentaje de Illi se mide en los horizontes A y C, a diferencia de la roca parental, en el horizonte C se observa un menor contenido de Esm. Algo similar ocurre en el suelo coluvial (VC-7), pero con menor abundancia de Cao en el horizonte A y un contenido de Ver cercano a 5% en el horizonte B. Finalmente, en el suelo formado sobre la aplita (VC-9) las arcillas Illi y Cao son más abundantes en los horizontes A y B (5 a 9%) y en el suelo del horizonte C se reconoce también Verm en un bajo porcentaje (Fig. 4.21).

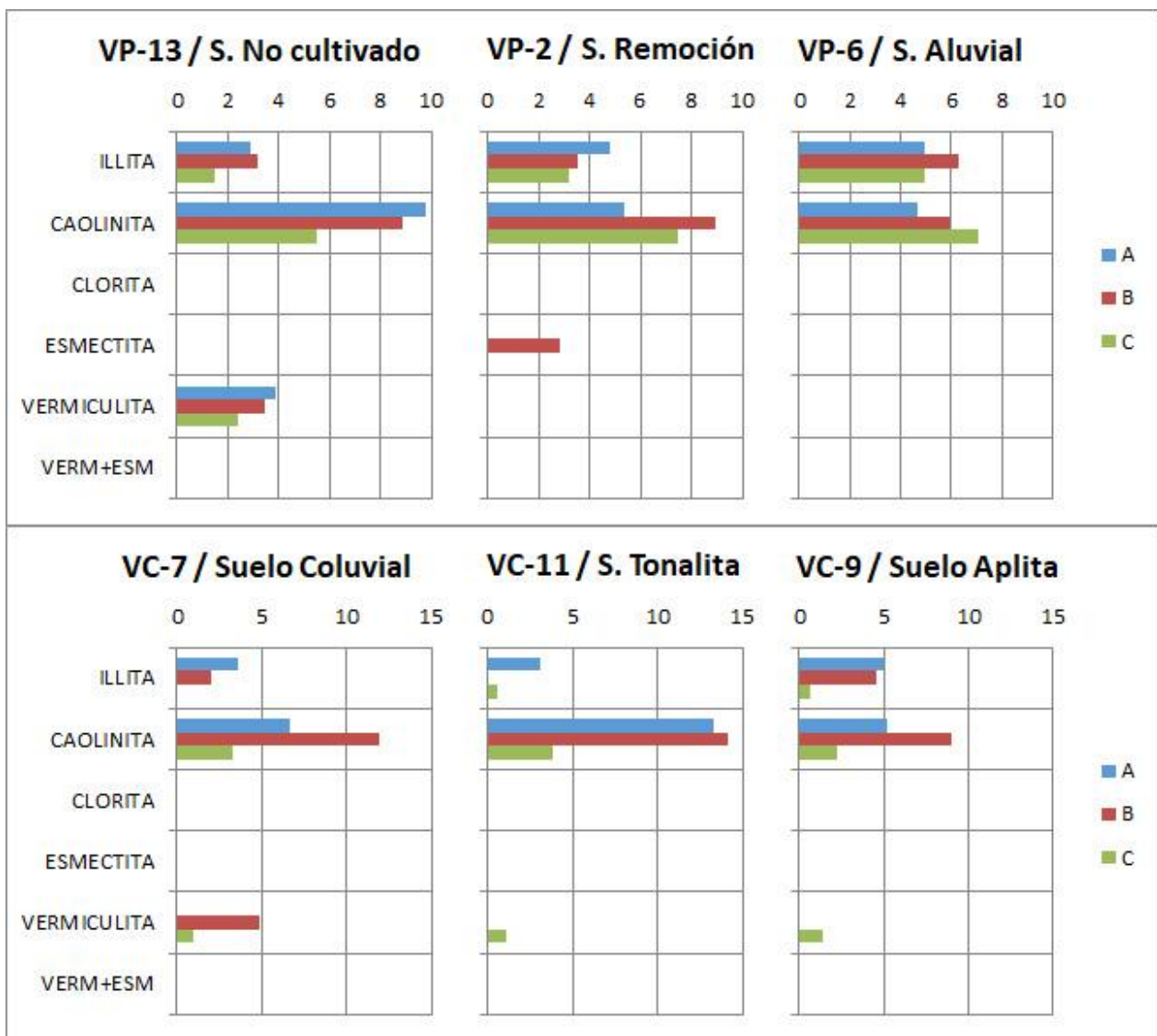


Figura 4.21 Gráficos de barra con la mineralogía de filosilicatos (arcillas) en los horizontes A, B y C de los perfiles de suelos seleccionados de Casablanca: (arriba) VP-13 (No cultivado), VP-2 y VP-6 del cuartel Piedemonte; (abajo) VC-7, VC-11 y VC-9 del cuartel Cerro. Resultados obtenidos de Salgado (2019).

#### 4.4.6.3 Propiedades físicas y químicas del suelo en Casablanca

El suelo en las tres calicatas seleccionadas del cuartel Piedemonte (VP-2, VP-3 y VP-6) presentan un contenido mayor a 50% de partículas tamaño arena en todas las muestras, con una proporción de arcilla entre 4.2 y 16.6% (Fig. A4.2; Anexos) y su textura es clasificada como franco arenosa (Tabla A4.17; Anexos). El promedio de la densidad aparente es 1.77 g/cc y, en general, es similar para todas las muestras y los horizontes (Fig. 4.22). La capacidad de intercambio catiónico CIC es en promedio 12.1 meq/100g para los suelos del cuartel Piedemonte y el porcentaje de materia orgánica (%MO) varía desde 1.31% en promedio en el horizonte A, 0.40% en el horizonte B, hasta 0.13% en el horizonte C (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Estadísticas del contenido de materia orgánica (%MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos seleccionados de los cuarteles Cerro (VC) y Piedemonte (VP), suelos cultivados y blanco (no cultivado), datos en general y por horizontes. Viña de Casablanca.

	% MO			CIC (meq/100gr)		
	Blanco (VP)	Piedemonte (VP)	Cerro (VC)	Blanco (VP)	Piedemonte (VP)	Cerro (VC)
Max	1.06	1.73	1.07	16.7	21.6	18.7
Min	0.33	0.01	0.01	8.5	6.2	2.5
Rango	0.73	1.72	1.06	8.2	15.4	16.2
Media	<b>0.8</b>	<b>0.67</b>	<b>0.46</b>	<b>12.8</b>	<b>12.1</b>	<b>8.0</b>
Desv. Est.	0.41	0.62	0.41	4.1	5.1	4.4
$\bar{X}$ Horiz A	1.01	1.31	0.97	13.2	10.3	10.2
$\bar{X}$ Horiz B	1.06	0.40	0.36	16.7	13.8	7.5
$\bar{X}$ Horiz C	0.33	0.13	0.06	8.5	12.4	6.3

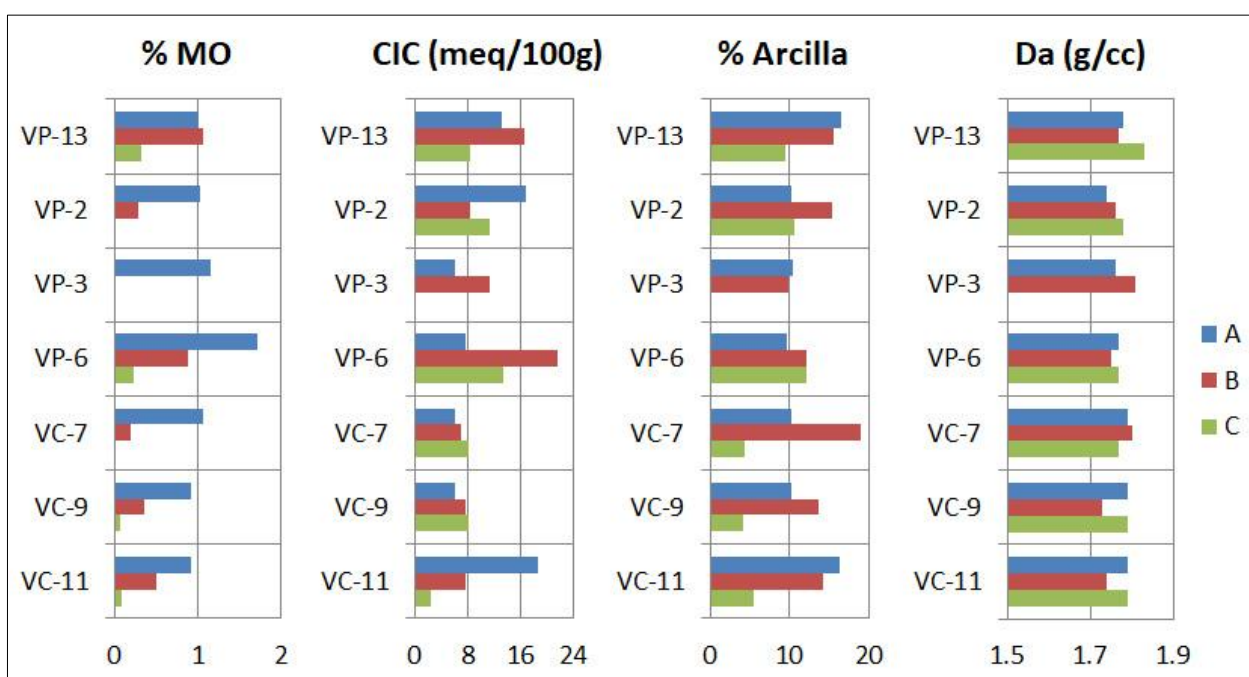


Figura 4.22 Contenido de materia orgánica (%MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), arcillas (% Arcilla) y densidad aparente (Da) en siete suelos seleccionados y en los horizontes A, B y C en Casablanca.

Por otra parte, las propiedades de los suelos como textura y densidad aparente en los tres perfiles de suelos del cuartel Cerro (VC-7, VC-9 and VC-11) son similares a las reconocidas en el cuartel Pendiente (VP), con una textura franco arenosa (Tabla A4.17; Anexos) y un promedio de 1.78 g/cc de densidad aparente. La media del CIC en este cuartel es inferior al de VP ( $\bar{X}_{CIC-VC} = 8.0$  meq/100g) y el contenido de materia orgánica es significativamente dependiente del horizonte, con un promedio de 0.97% en el horizonte A, 0.36% en el horizonte B y 0.06% en el horizonte C (Tabla 4.4).

## 4.5 RESULTADOS VIÑA DE SAN ANTONIO

### 4.5.1 GEOLOGÍA A ESCALA DE CUARTEL (1:5.000) EN SAN ANTONIO

En esta área se estudian los cuarteles “Terraza” y “Pendiente”, en donde analizan nueve y tres calicatas, respectivamente. Los perfiles de suelos CT-1 a CT-9 corresponden al cuartel Terraza y los perfiles CP-10 a CP-12 al cuartel Pendiente. Además, entre ambos cuarteles, en una zona no cultivada, se ubica la calicata C-13 (Fig. 4.23). Los perfiles de suelo tienen profundidades que varían entre 130 a 168 cm.

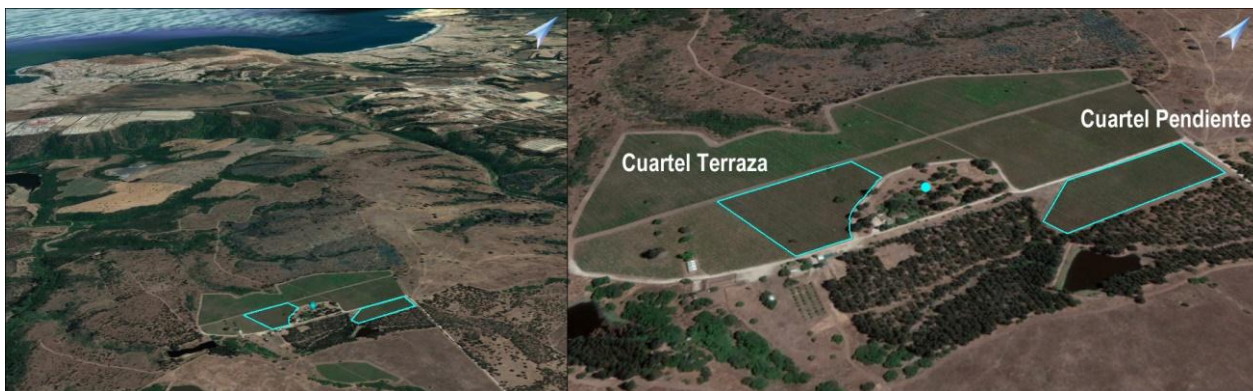


Figura 4.23 Cuarteles Terraza y Pendiente de la viña de San Antonio (A) Contexto geomorfológico del entorno de la viña (B) Detalle de los cuarteles en estudio, en el punto calipso se ubica la calicata blanco. Imágenes obtenidas desde Google Earth.

#### 4.5.1.1 Cuartel Terraza (CT), San Antonio

El cuartel Terraza posee un área aproximada de 2,8 ha y se emplaza sobre una terraza de abrasión marina ubicada aproximadamente 200 m sobre el nivel del mar actual (Fig. 4.23A), en un terreno plano o sin pendiente. A partir de las calicatas se comprobó que el suelo de este cuartel está desarrollado sobre una arenisca de grano medio y coloración amarillenta de la Formación Navidad (Fig. 4.24), la cual se reconoce en el horizonte C de las calicatas CT-1 y CT-8 (Fig. 4.25).

Sobre las areniscas se observa un alto porcentaje de clastos redondeados sin un orden estratigráfico claro, además el suelo presenta abundantes nódulos de Fe-Mn y clastos calcáreos (conchas en descomposición). En las calicatas CT-2 a CT-7 y CT-9, la capa de areniscas correspondiente al horizonte C se observa un suelo marrón anaranjado muy compacto, rico en arcillas con nódulos de Fe-Mn y restos de conchas (Fig. 4.26).

Este cuartel muestra una evidente intervención antrópica reconociendo bloques de cemento y ladrillos en los primeros 20 cm de profundidad (ejemplo en calicatas CT-3 y CT-5), además de un fuerte agrietamiento y pérdida de los horizontes (Figs. 4.27). Esto se debe a que previo a la



plantación del viñedo, el uso de suelo de este cuartel fue una plantación de eucaliptus, los cuales fueron removidos y el suelo fue arado con maquinaria hasta una profundidad aproximada de 1 m.

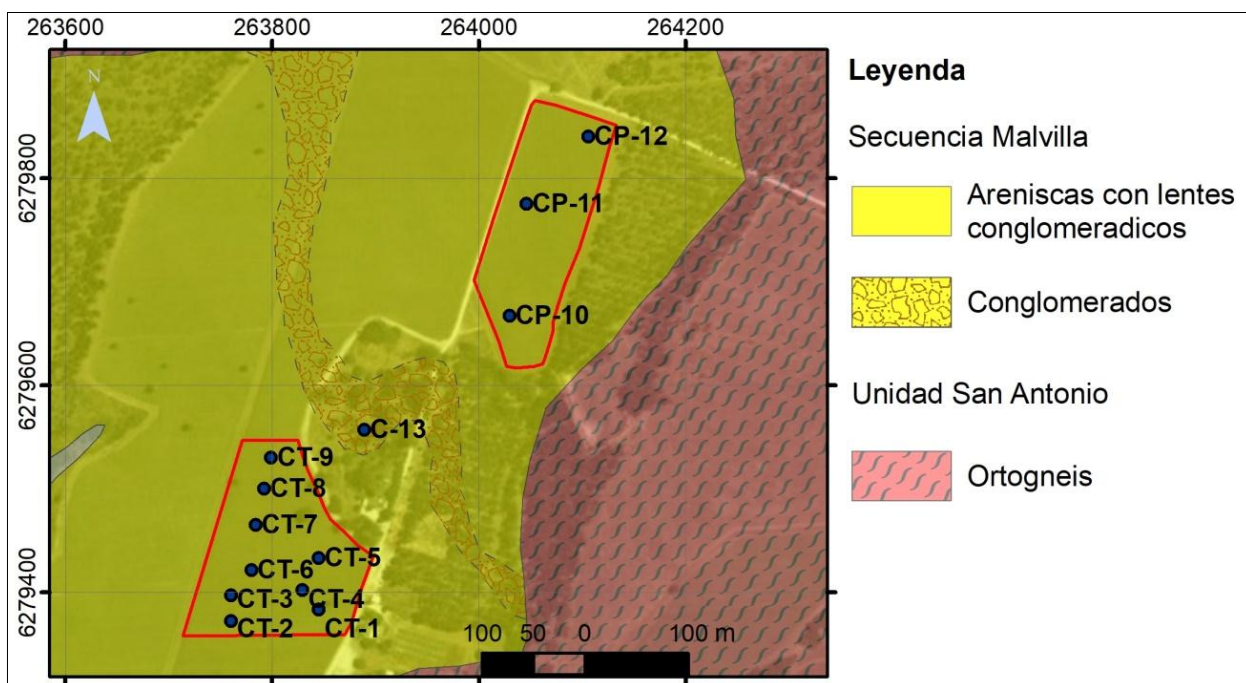


Figura 4.24 Mapa geológico a escala cuartel de viña en San Antonio. Cuartel Terraza (calicatas CT) Calicata blanco C-13 y cuartel Pendiente (calicatas CP).

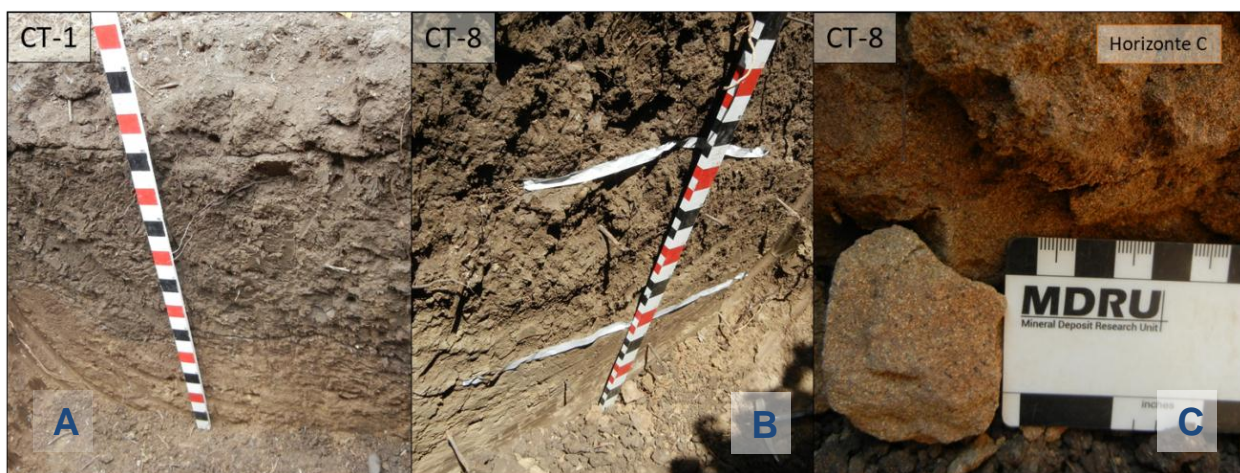


Figura 4.25 (A) Calicata CT-1, (B) Calicata CT-8 y (C) Arenisca reconocida en el horizonte C de la calicata CT-8. Cuartel Terraza, viña de San Antonio.

#### 4.5.1.2 Cuartel Pendiente (CP), San Antonio

El cuartel Pendiente de casi 2 ha de superficie se encuentra en un sector relativamente plano, con una leve pendiente hacia el SE, dada por la presencia de una incipiente quebrada (Fig. 4.23B). El suelo está formado in-situ sobre la secuencia sedimentaria marina (Secuencia



Malvilla), la cual queda muy bien expuesta en la calicata CP-10 (Fig. 4.28), en donde se observa, desde base a techo, al menos 45 cm de arenisca de grano medio sin estratificación, 22 cm de arenisca de grano medio con estratificación planar y lentes milimétricas de granos de magnetita, 20 cm de conglomerado grano soportado y, finalmente, unos 65 cm de suelo con presencia de clastos redondeados aleatorios, nódulos de Fe-Mn y alto contenido de arcillas (Fig. 4.29). A diferencia del perfil de suelo CP-10, en las calicatas CP-11 y CP-12 se observa un horizonte C representado por la arenisca con alto contenido de magnetita, pero sin la presencia de capas de conglomerados o clastos redondeados (Fig. 4.28).



Figura 4.26 Calicatas CT-2, CT-4, CT-6, CT-7 y CT-9, mostrando horizonte C arcilloso que proviene de la meteorización de la arenisca de grano medio; horizontes superiores intervenidos. Cuartel Terraza, viña de San Antonio.

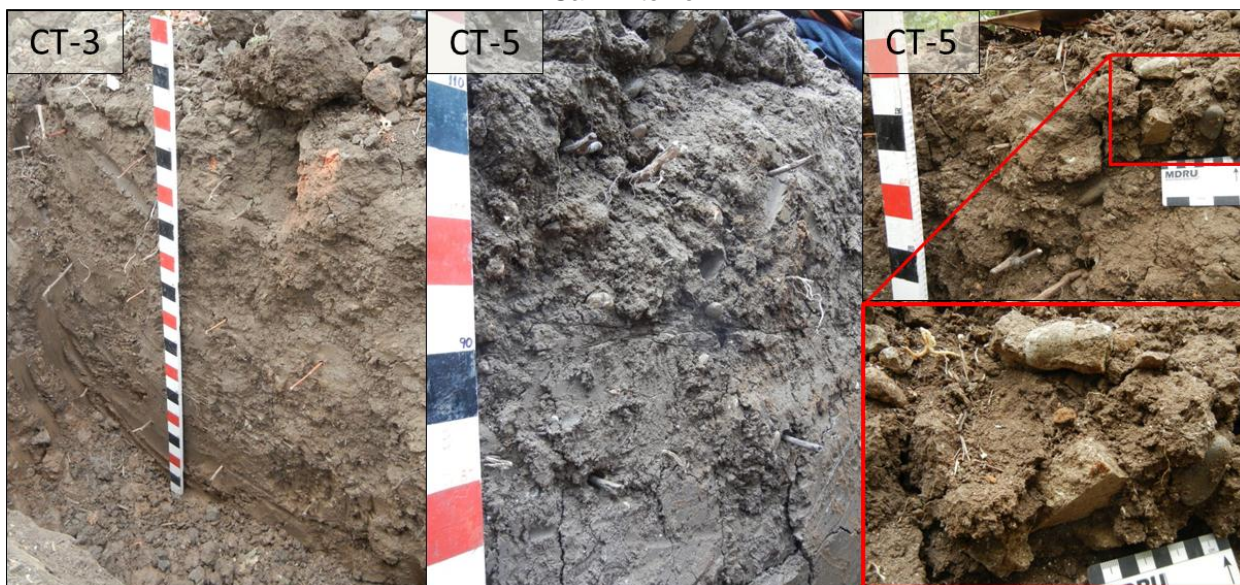


Figura 4.27 Calicatas CT-3 y CT-5 mostrando la intervención antrópica de horizontes superiores, se reconocen bloques de ladrillos y cemento. Cuartel Terraza, viña de San Antonio.



### 4.5.1.3 Calicata no cultivada

Tal como fue descrito, los cuarteles Terraza y Pendiente presentan un material similar, aunque se observan notorias diferencias en el grado de intervención del suelo. No obstante lo anterior, entre ambos cuarteles se ubica la calicata C-13 en una zona no cultivada y cuyo material parental corresponde a un banco de conglomerados de al menos 110 cm de espesor (Fig. 4.30A), el cual podría corresponder al paleo-cause de un río (Fig. 4.24). Este tipo de material se reconoce también en zonas cercanas, por ejemplo en un corte de camino ubicado 2,5 km al norte de la viña (Fig. 4.30B).

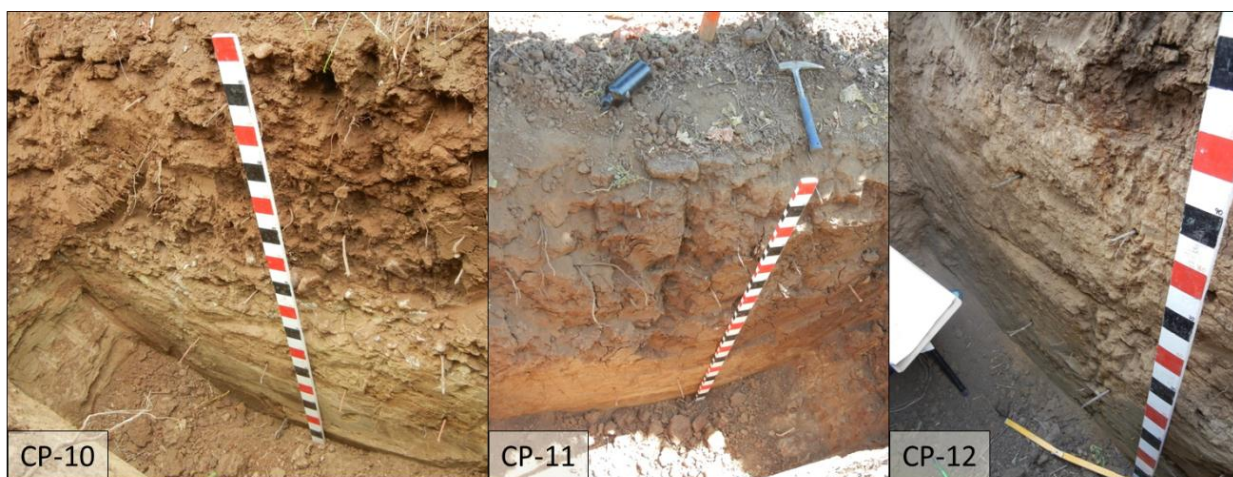


Figura 4.28. Calicatas CP-10, CP-11 y CP-12 del cuartel Pendiente, formado in-situ sobre una secuencia sedimentaria marina que incluye areniscas y una capa de conglomerado.



Figura 4.29. Detalle de calicata CT-10 que muestra de base a techo: 65 cm de suelo (formado desde una arenisca), 20 cm de conglomerado (a 85 cm de profundidad), 22 cm de arenisca con estratificación planar (a 107 cm de profundidad) y al menos 45 cm de arenisca sin estratificación (a 152 cm de profundidad).

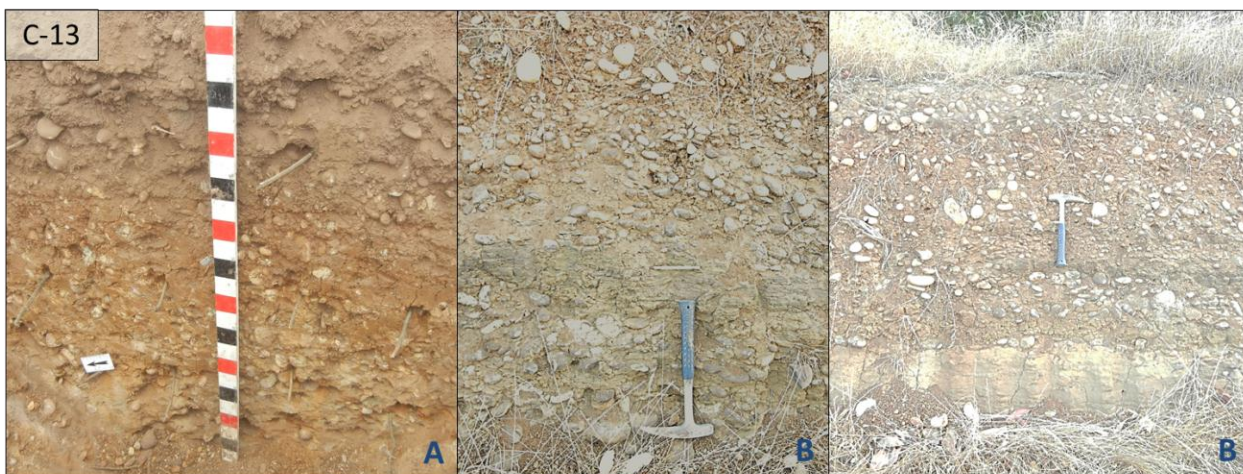


Figura 4.30. (A) Calicata blanco C-13 en la viña de San Antonio. (B) Imágenes de corte de camino ubicado 2.5 km al norte de viña mostrando similar material parental conformado por banco de conglomerado.

#### 4.5.2 FISICOQUIMICA DE SUELOS EN SAN ANTONIO

Los parámetros fisicoquímicos medidos en la viña de San Antonio en las cuatro temporadas, son presentados en la Tabla 4.5, por medio de sus estadísticas básicas. Los datos en detalle de todas las mediciones por horizonte se exponen en la Tabla A4.18.

Tabla 4.5. Estadísticas básicas de las condiciones fisicoquímicas del suelo medidas en cuatro temporadas en la viña de San Antonio.

Viña		pH	CE mS/cm	T °C	Eh mV	Estadística	pH	CE mS/cm	T °C	Eh mV	
San Antonio	Invierno 2014	nd	1,79	13,6	nd	Promedio	7,21	1,64	11,9	211	Invierno 2015
		nd	2,80	22,3	nd	Máximo	8,35	2,68	13,1	300	
		nd	0,29	10,2	nd	Mínimo	5,57	0,02	10,1	136	
		nd	0,56	3,0	nd	Desv. est.	0,6	0,62	0,6	42	
		0	152	152	0	<i>n</i>	152	152	152	38	
	Verano 2015	6,69	1,32	19,4	nd	Promedio	6,73	0,84	22,1	246	Verano 2016
		7,92	2,59	31,0	nd	Máximo	8,24	2,55	27,9	288	
		5,71	0,00	16,3	nd	Mínimo	5,16	0	19,7	192	
		0,52	0,65	2,4	nd	Desv. est.	0,73	0,64	2,0	24	
		158	158	158	0	<i>n</i>	156	156	156	39	

El pH en San Antonio fue medido en las temporadas V15, I15 y V16; sin embargo, en la temporada I14 se mide el pH en solución, registrando valores extremos de 5,87 y 8,93 y un promedio de 7,60. A partir de las mediciones *insitu* en el perfil de suelo, se tiene un pH promedio estadísticamente mayor en la temporada I15 ( $\bar{x}_{I15}=7,21$ ), con valores medios menores en las mediciones de verano ( $\bar{x}_{V15}=6,69$ ;  $\bar{x}_{V16}=6,73$ ), siendo ambos promedios comparables entre sí (Figs. 4.31A y 4.31B).



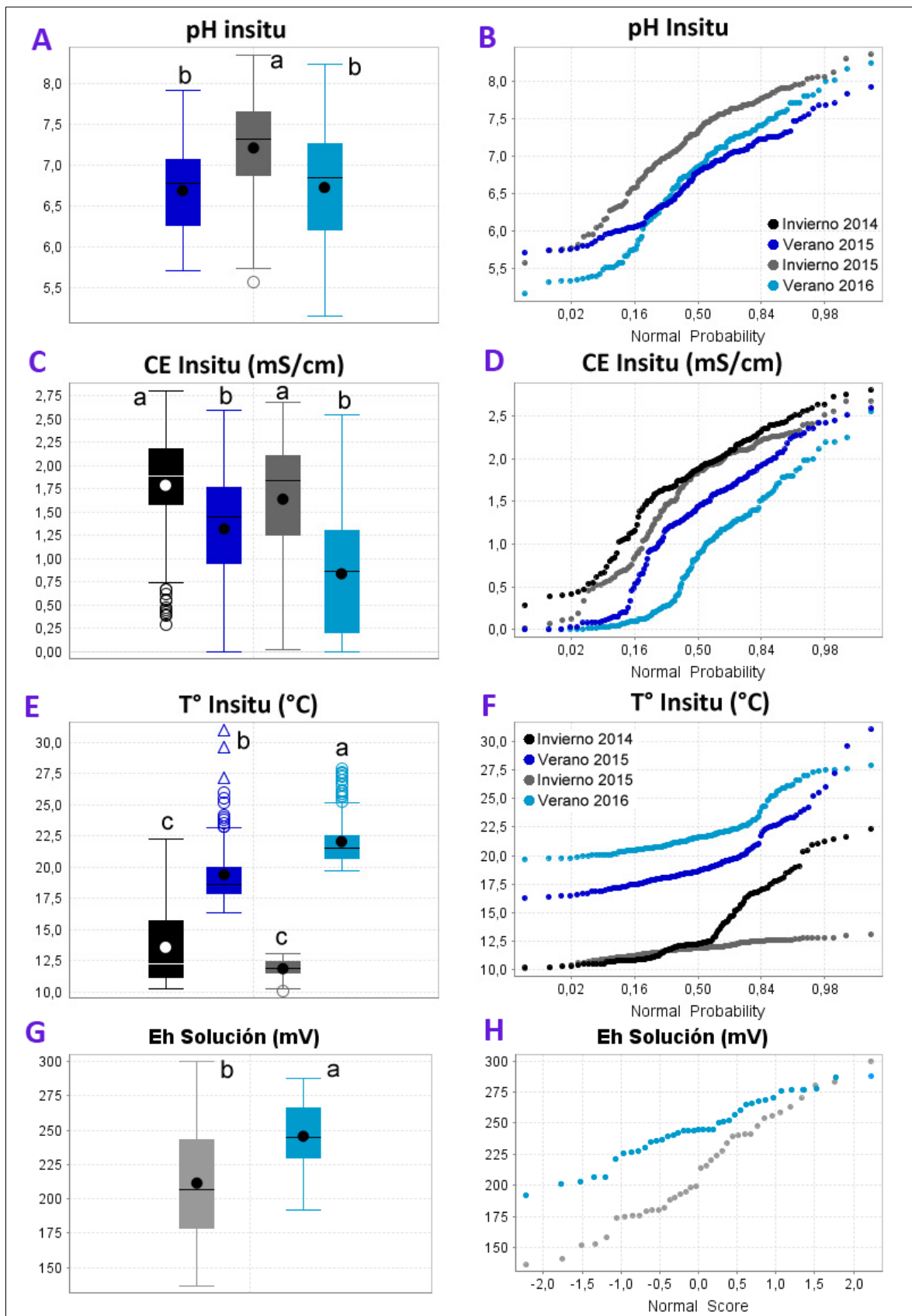


Figura 4.31. Gráficos de caja y de probabilidad acumulada con los parámetros fisicoquímicos medidos en las cuatro temporadas en la viña de San Antonio. (A-B): pH. (C-D): CE. (E-F): T°. (G-H): Eh. Letras sobre cada barra indican diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza  $p < 0.05$ .



Temperatura y CE fueron medidas en todas las temporadas. La conductividad eléctrica es mayor en las mediciones de invierno, con valores medios estadísticamente comparables en ambas temporadas ( $\bar{x}_{I14}=1,79$  mS/cm;  $\bar{x}_{I15}=1,64$  mS/cm), mientras que el promedio de CE es superior en V15 ( $\bar{x}_{V15}=1,32$  mS/cm) respecto al promedio de CE registrado en V16 ( $\bar{x}_{V16}=0,84$  mS/cm), aunque son estadísticamente comparables; este hecho es coincidente con la ausencia de riego en esta viña durante el verano de 2016. Cabe destacar la alta variabilidad de los datos de CE medidos en todas las temporadas, con valores máximos y mínimos muy contrastantes (Figs. 4.31C y 4.31D).

Las temperaturas promedio de los suelos en San Antonio son estadísticamente mayores en las temporadas de verano, en relación a las temporadas de invierno, entre éstas, la temporada de Invierno 2015 es donde se mide la menor T° promedio del suelo ( $\bar{x}_{I14}=13,6^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{x}_{I15}=11,9^{\circ}\text{C}$ ), mientras que la T° media estadísticamente mayor se registra en la temporada V16 ( $\bar{x}_{V15}=19,4^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{x}_{V16}=22,1^{\circ}\text{C}$ ), concordante con las mayores temperaturas atmosféricas registradas durante el mes de medición en esta localidad (Figs. 4.31E y 4.31F).

Finalmente, las condiciones de Eh registradas en solución en las temporadas I15 y V16; indican que en promedio, el Eh es significativamente más oxidante en verano ( $\bar{x}_{V16}=+246$  mV) que en la temporada de invierno ( $\bar{x}_{I15}=+211$  mV), sin embargo, se destaca la alta variabilidad en los valores mínimo y máximo de esta temporada (Figs. 4.31G y 4.31H).

#### 4.5.3 GEOQUIMICA DE LOS SUELOS DE SAN ANTONIO

La geoquímica de los suelos de San Antonio ha sido dividida según los dos cuarteles en estudio, cuartel Terraza y cuartel Pendiente, ambos con una Arenisca como material parental. Sin embargo, en el cuartel Terraza (CT) el suelo muestra una fuerte intervención antrópica y pérdida de los perfiles originales, a diferencia del cuartel Pendiente (CP). De esta forma, el cuartel Terraza es considerado como un suelo de arenisca con intervención antrópica (n=26) y el cuartel Pendiente como un suelo de arenisca (n=11). El suelo no cultivado (n=3) tiene como material parental un Conglomerado, levemente diferente a lo observado en los cuarteles cultivados.

##### 4.5.3.1 Nutrientes en suelo total en San Antonio

Los resultados de los contenidos de nutrientes en los suelos de San Antonio se presentan mediante los estadígrafos básicos en la Tabla A4.19 y gráficos de caja en la figura 4.32.

El suelo blanco o no cultivado presentan los más altos promedios en P, K, Cu, Al y Rb, con los menores valores medios para Ca y Mg. Por el contrario, el suelo altamente intervenido (cuartel

Terraza, CT) presenta el mayor contenido de Ca, pero las medias más bajas en P, Fe, Zn, Na y Ti. Finalmente, los suelos formados sobre Arenisca (cuartel Pendiente, CP) poseen los mayores promedios de Fe, Mn, Zn y Ti, coincidente con lentes de magnetitas en la arenisca parental, y además muestra las medias menores de Cu y Rb (Fig. 4.32).

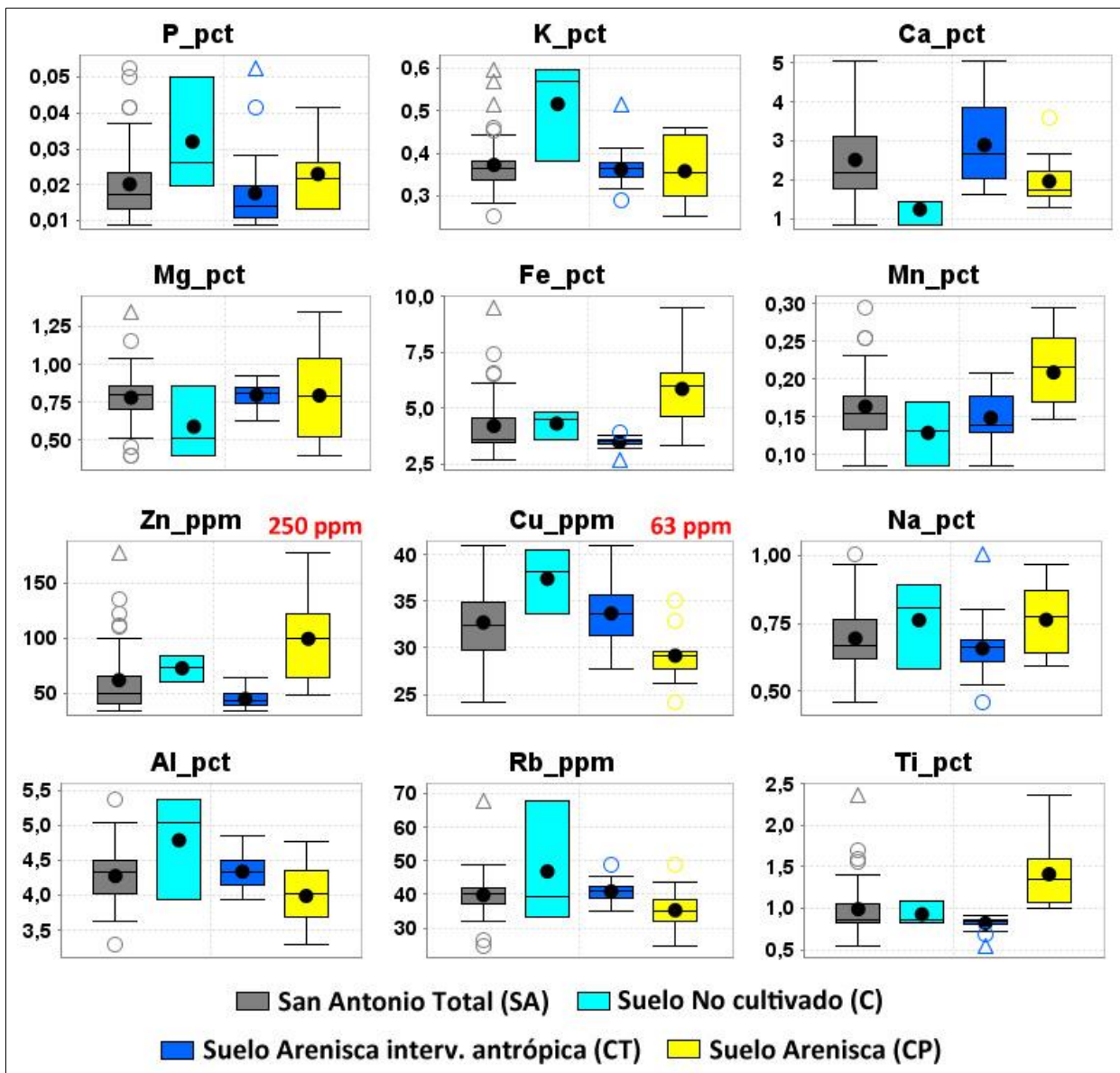


Figura 4.32. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes en suelo total de los materiales parentales muestreados en San Antonio. Valores en rojo límite en suelos CCME (2016).

#### 4.5.3.2 Nutrientes en la fase biodisponible del suelo en San Antonio

Las estadísticas de las concentraciones de los nutrientes en la fase biodisponible del suelo, en ambas temporadas de medición, se presentan en la Tabla A4.20, así como la distribución estadística se puede visualizar en los diagrama de caja (Fig. 4.33).

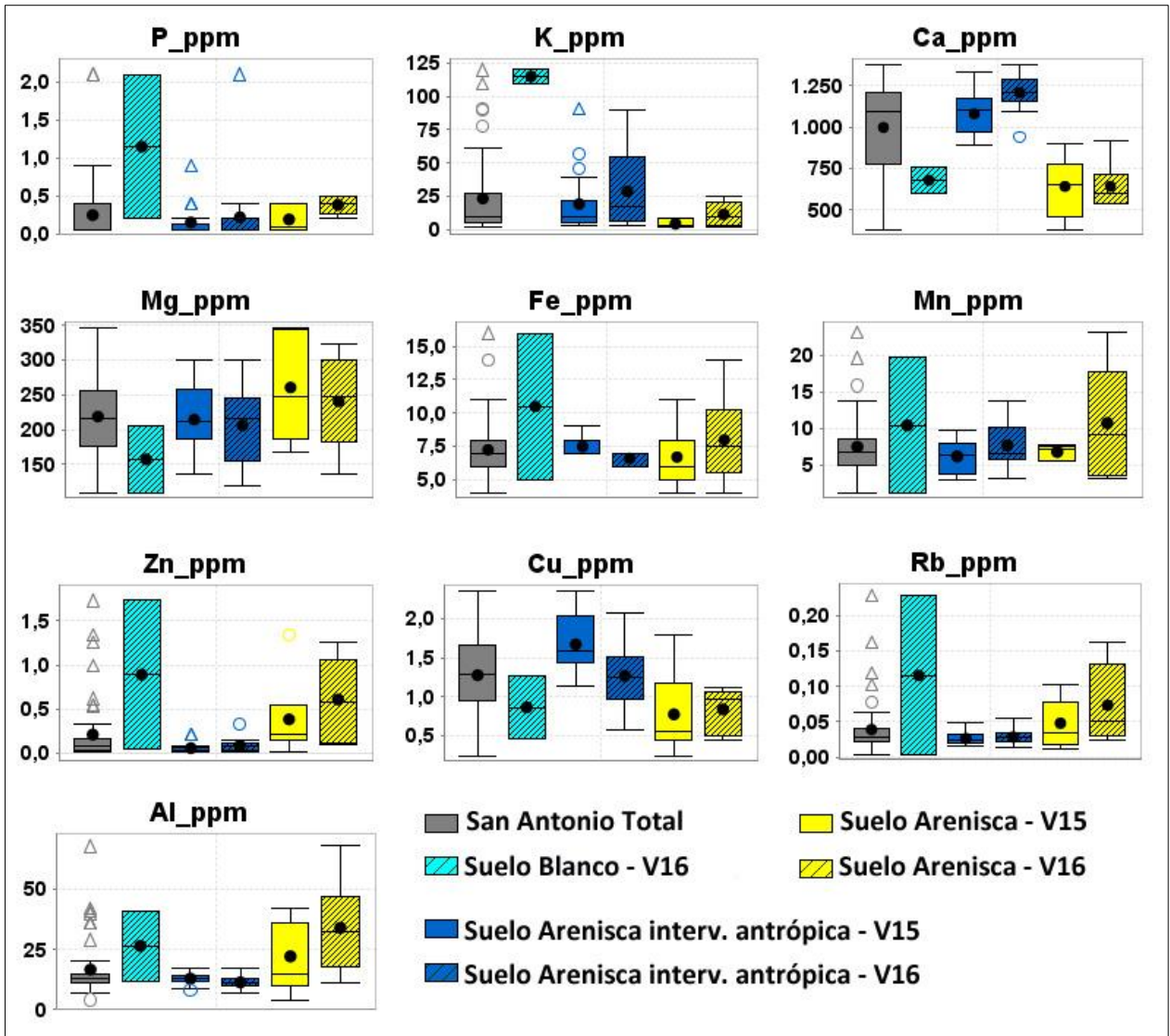


Figura 4.33. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes en la fase biodisponible del suelo en los diferentes materiales parentales muestreados en San Antonio.

Al igual que en los resultados para suelo total, los promedios de P, K y Rb en la fase biodisponible son mayores en el suelo no cultivado (cajas calipso) respecto a los suelos cultivados, además otros elementos como Fe y Zn muestran esta misma característica. Por otra parte, en esta fase, el suelo blanco muestra una alta dispersión de los datos, particularmente para los nutrientes P, Fe, Mn, Zn y Rb (Fig. 4.33). Concentraciones medias más bajas en el suelo cultivado solo se registran para Mg, lo cual también se repite en la química total del suelo.

Calcio y cobre presentan las mayores concentraciones en los suelos del cuartel Terraza. Además otras diferencias reconocidas entre cuarteles corresponden a mayores promedios comparativos para K en los suelos intervenidos antrópicamente (CT) y para Mg, Zn, Rb y Al en

los suelos derivados de Arenisca (CP). Por último, se destaca que en general, no existen mayores variaciones entre las mediciones realizadas en las distintas temporadas (Fig. 4.33).

#### 4.5.3.3 Metales en suelo total en San Antonio

Las concentraciones de metales en los suelos de San Antonio, se muestran mediante las estadísticas básicas (Tabla A4.21; Anexos) y a través de la distribución estadística representada en gráficos de caja (Fig. 4.34).

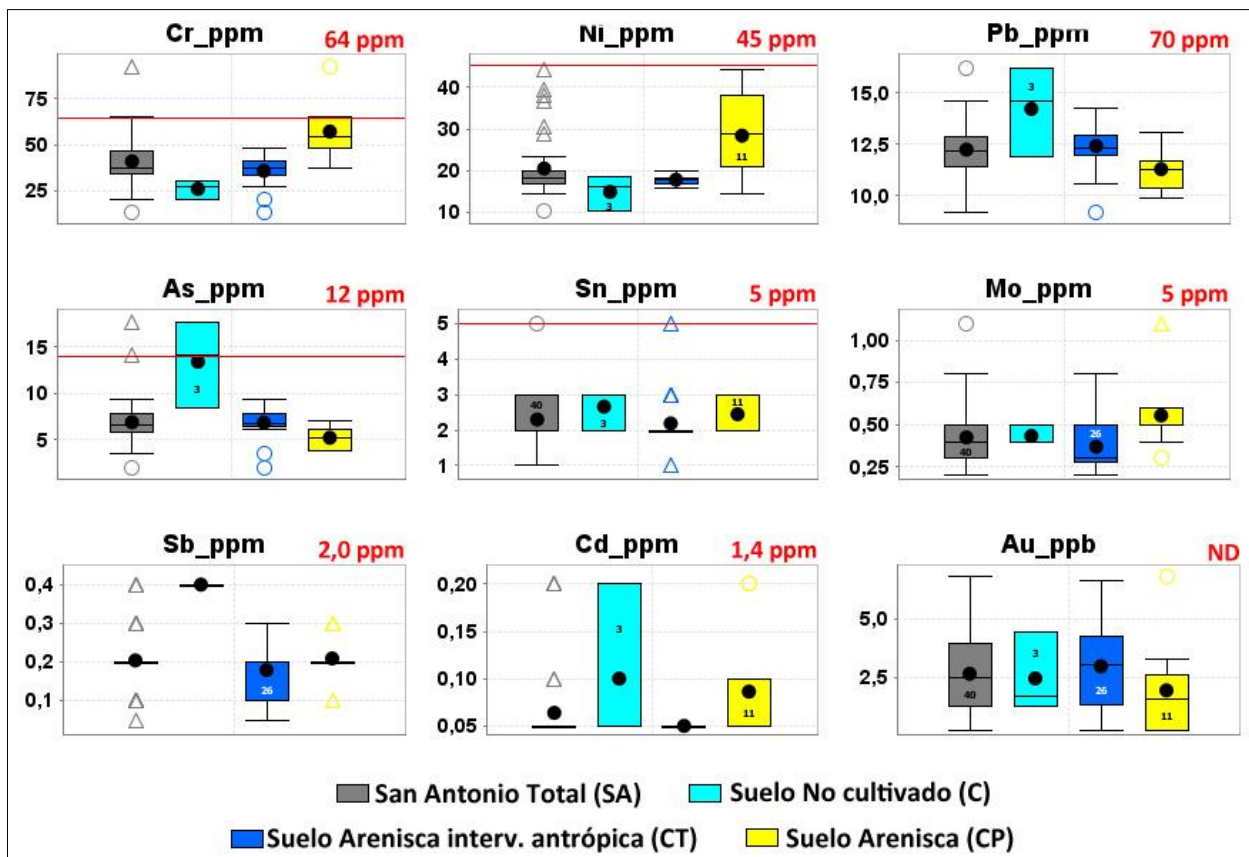


Figura 4.34. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en suelo total de los materiales parentales muestreados en San Antonio. Valores en rojo límite en suelos CCME (2016).

Los resultados comparados con la Norma canadiense para suelos agrícolas, revelan que Cr en el suelo de Arenisca (CP), As en el suelo no cultivado y Sn en el suelo del cuartel Terraza (CT) poseen algunos valores *outliers* que superan a este límite. Por otra parte, los valores medidos en los suelos no cultivados muestran promedios más altos, respecto a los suelos cultivados, en los metales Pb, As, Sb y Cd y las medias más bajas en Cr y Ni (Fig. 4.34).

Diferencias entre ambos cuarteles se registran a través de un mayor promedio comparativo para Cu, Ni y Mo y menores medias para Pb y As en los suelos de Arenisca (CP), respecto a los suelos del cuartel Terraza (Fig. 4.34).



#### 4.5.3.4 Metales en la fase biodisponible del suelo en San Antonio

Los metales con suficiente respuesta analítica en la fase biodisponible del suelo, en la viña de San Antonio, corresponden a Ni, Pb, Mo, Cd, Ag y Au. Los resultados en las dos temporadas de medición se presentan en la tabla A4.22 y figura. 4.35 a través de sus estadígrafos básicos y distribución estadística.

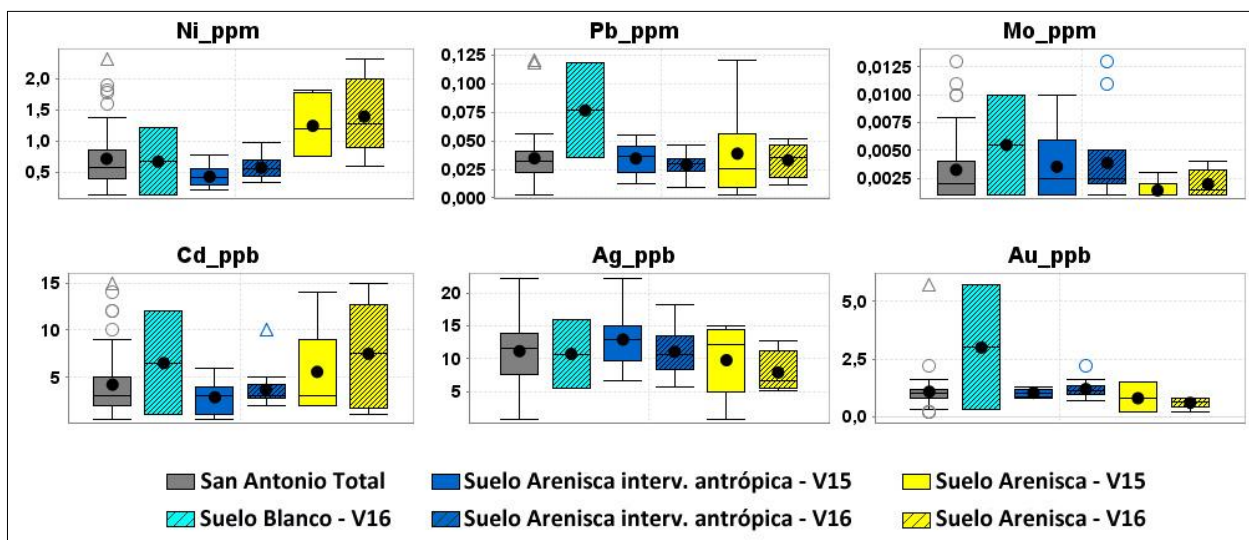


Figura 4.35. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en la fase biodisponible del suelo en los diferentes materiales parentales muestreados en San Antonio.

Los elementos Pb, Au y Mo muestran promedios comparativamente más altos en suelos no cultivados respecto a los suelos cultivados, esto también se observa para Pb en la química total de suelo. Diferencias entre los suelos cultivados en los cuarteles CP y CT se reconocen para los metales Ni y Cd, cuyas medias son relativamente mayores en los suelos de arenisca del cuartel CP; mientras que Mo es superior en el cuartel CT (Fig. 4.35), en donde el suelo posee una mayor intervención antrópica. Se destaca que Ni también es mayor en el cuartel CP en la química de suelo total.

#### 4.5.4 QUÍMICA DE FRUTOS EN SAN ANTONIO

El contenido de nutrientes y metales en las bayas de Pinot Noir de la viña de San Antonio se expone a través de los cuarteles Terraza (n=9), conformado por suelos fuertemente intervenidos, y Pendiente (n=3), ambos desarrollados sobre una secuencia sedimentaria compuesta principalmente por una arenisca o arcosa.

#### 4.5.4.1 Nutrientes en frutos de San Antonio

En la figura 4.36 se presentan los gráficos de caja que describen la distribución estadística de los nutrientes en las dos temporadas de medición. Además los estadígrafos básicos se pueden observar en la tabla A.4.23 (Anexos).

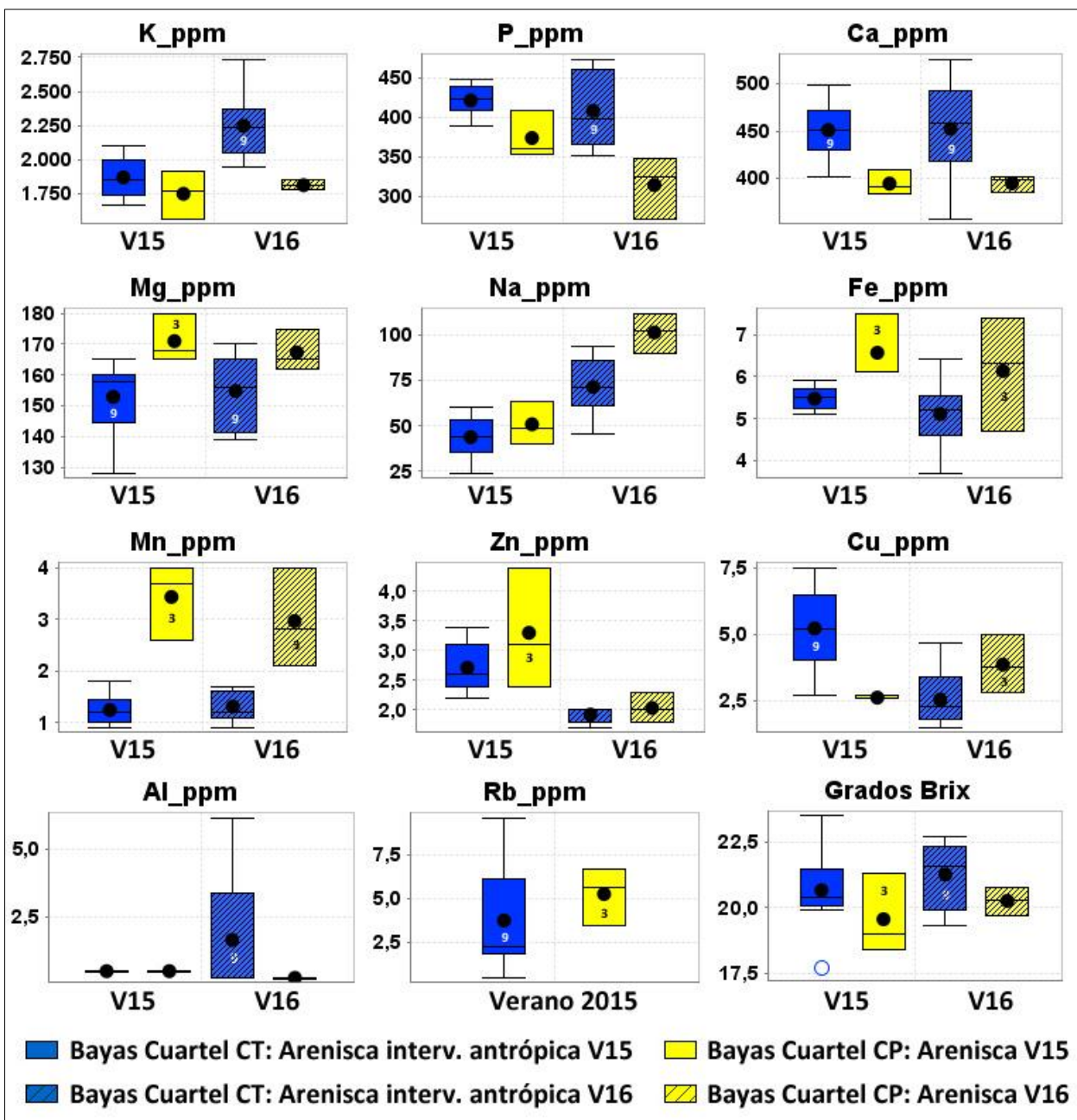


Figura 4.36. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes y grados brix de los frutos de San Antonio.

Los grados brix de las bayas muestran resultados concordantes para ambas temporadas aunque con un dato anómalamente bajo en el cuartel Terraza durante la temporada V15 de

17,7° (círculo azul). Existe una notoria superioridad en los grados brix promedio del cuartel Terraza (cajas azules) respecto a los del cuartel Pendiente (cajas amarillas). Cabe destacar que las plantas de éste último cuartel son tres años más jóvenes (Fig. 4.36).

La abundancia relativa de los nutrientes en las bayas de San Antonio se distribuye de la siguiente forma:  $K \gg Ca > P > Mg > Na \gg Fe > Cu > Rb > Zn > Mn > Al$ . Al igual que en las bayas de la misma cepa en Casablanca, el elemento más abundante corresponde al K.

Los contenidos medios de K, P y Ca en las bayas son superiores en el cuartel Terraza en las dos temporadas (cajas azules), en concordancia con la distribución mostrada por el grado brix de las bayas (estado de madurez). Por el contrario, los nutrientes Mg, Fe y Mn presentan promedios mayores en el cuartel Pendiente (cajas amarillas; Fig. 4.36).

Los nutrientes Na y Zn, muestran promedios levemente mayores en las bayas del cuartel Pendiente. Sin embargo, el rasgo más distintivo en la distribución de estos elementos es una importante variabilidad en ambas temporadas, siendo mayor en la temporada V15 para Zn y (cajas sin tachado) mayor para la temporada V16 para Na (cajas tachadas; Fig. 4.36), precisamente el año en que no se realizó riego en el viñedo.

Finalmente, el elemento Al presenta respuesta solamente en el análisis de la temporada V16 y solamente en las bayas del cuartel Terraza (caja azul tachada) y Rb con análisis sólo en Verano 2015, presenta un leve menor promedio en las bayas del cuartel Terraza, pero a la vez con una mayor dispersión de los datos (caja azul; Fig. 4.36).

#### **4.5.4.2 Metales en frutos en San Antonio**

Los resultados de los contenidos de metales se presentan en la Tabla A4.24 por medio de los estadígrafos básicos, mientras que la distribución estadística se puede observar gráficamente a través de los diagramas de caja en la figura 4.37. Los metales que poseen respuesta analítica en las bayas corresponden a Cu, Zn y Cr, este último sólo en la temporada V16. Además Pb y Sn tienen respuesta analítica sólo una muestra en el verano de 2016.

El Cu medido en las bayas del cuartel Terraza durante la temporada V15 (cajas azules) presenta valores promedios ( $\bar{x}_{Cu-V15} = 5,2$  ppm) mayores a la norma establecida en la Legislación chilena para jugo de fruta (5 ppm; Tabla A4.24 en Anexos), además el valor anómalo de Pb en la muestra CT-5 (0,67 ppm) también sobrepasa el límite para este metal. Cabe mencionar que en este perfil de suelo se observaron trozos de cemento.

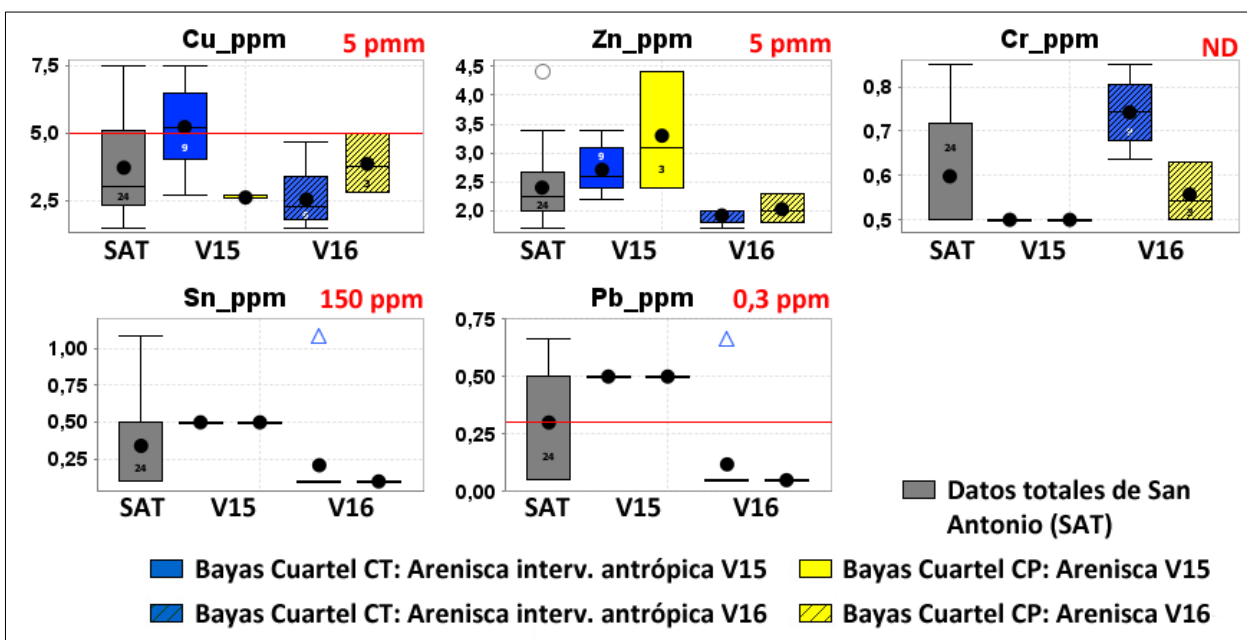


Figura 4.37. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en los frutos de San Antonio. Valores en rojo corresponden al Reglamento chileno sanitario de los alimentos (1997).

Para la temporada V16, los resultados muestran que la abundancia relativa de los metales es mayor para Cu y Zn, con valores entre 0-10 ppm, luego para Cr (valores entre 0,1-1 ppm) y menores para los metales Sn y Pb ( $Cu > Zn \gg Cr > Sn \approx Pb$ ), sólo con respuesta analítica en una muestra.

Los resultados de Cu en bayas coinciden con lo observado en suelos en la temporada V15, con mayores promedios relativos durante este verano (Fig. 4.37). Para la temporada V16 los frutos colectados en el cuartel Pendiente (caja amarilla tachada) poseen mayores medias de Cu en comparación con los del cuartel Terraza (caja azul tachada).

Para el elemento Zn se observan también diferencias entre temporadas, con una importante superioridad en el contenido de Zn en las bayas del Verano 2015 (cajas sin tachado). Sin embargo, en ambas temporadas las bayas del cuartel Pendiente (cajas amarillas) tienen un contenido promedio levemente mayor respecto a las del cuartel Terraza (cajas azules; Fig. 4.37). Por último, Cr en la temporada de medición V16 muestra valores contrarios a lo observado en el suelo total, aquí Cr es mayor en las bayas del cuartel Terraza (Fig. 4.37).

#### 4.5.5 HIDROQUÍMICA DE SAN ANTONIO

Las nueve muestras de aguas obtenidas en la cuenca de la viña de San Antonio, son dos muestras de lluvia y dos aguas subterráneas medidas en invierno de 2015 (I15), además de una muestra de tranque y cuatro muestras de aguas subterráneas colectadas en verano de 2016



(V16). La ubicación de cada muestra se observa en la figura A4.3 (Anexos). Por último, se debe mencionar que durante la temporada de verano 2016 la viña no realizó riego debido a la escasez de agua, por esto, no se cuenta con esta medición.

#### 4.5.5.1 Físicoquímica de aguas en San Antonio

Las mediciones de las condiciones físicoquímicas, obtenidas directamente en terreno en las estaciones I15 y V16, se presentan en la tabla A4.25 (Anexos). La distribución de estos datos se grafica en diagramas de caja para comparar las cuatro matrices de aguas (Fig. 4.38).

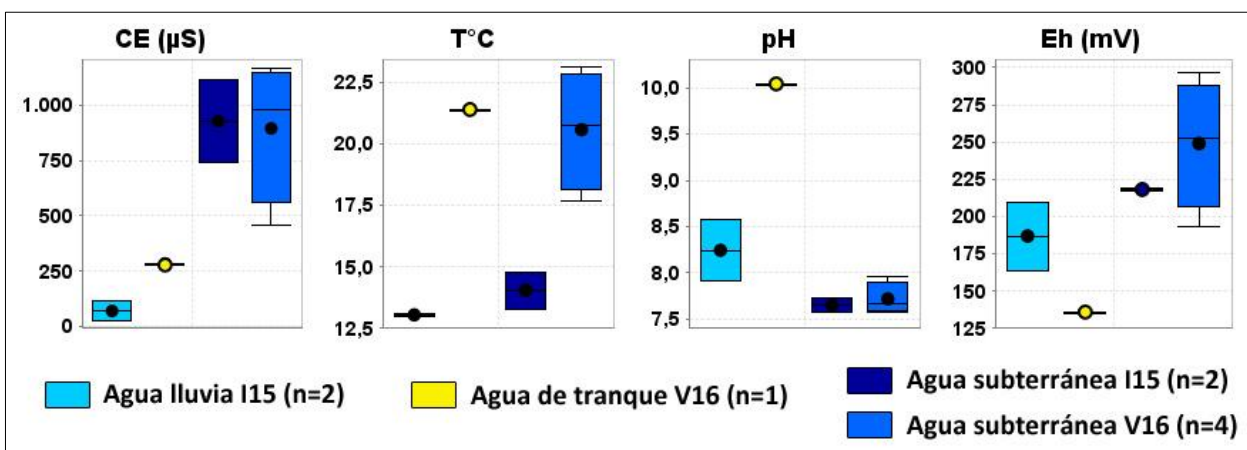


Figura 4.38. Parámetros físicoquímicos conductividad eléctrica (CE), temperatura (T), pH y potencial de óxido-reducción (Eh) medidos en terreno en las muestras de agua de San Antonio.

El agua de lluvia (caja celeste) presenta baja CE ( $\bar{x}_{CE} = 69,5 \mu\text{S}$ ) respecto a las otras muestras de aguas y un pH (7,91-8,58) relativamente más básico y con menores valores de Eh al de las aguas subterráneas (Fig. 4.38).

La muestra de agua de tranque muestra una conductividad eléctrica ( $286 \mu\text{S}$ ) media entre las aguas de lluvias y las aguas subterráneas, además considerablemente alto pH (10,04) y bajo Eh (+136 mV), respecto al resto de matrices de agua.

En cuanto a las aguas subterráneas, éstas poseen valores de CE considerablemente mayores a las muestras de aguas de lluvia y de tranque, con menores promedios en las muestras del verano ( $895 \mu\text{S}$ ) en comparación con las de invierno ( $929 \mu\text{S}$ ). Notoria diferencia en las temperaturas medidas en las aguas subterráneas en invierno ( $\bar{x}_T = 14^{\circ}\text{C}$ ) y en verano ( $\bar{x}_T = 20,6^{\circ}\text{C}$ ). El pH muestra valores medios de 7,7 en ambas temporadas, mientras que el Eh presenta alta dispersión en las muestras de aguas subterráneas medidas en verano (+193 a +297 mV).

#### 4.5.5.2 Nutrientes en aguas de San Antonio

Los resultados del contenido de nutrientes en las diferentes matrices de aguas medidas se presentan en la tabla A4.25, la distribución logarítmica de los datos se muestra en la figura 4.39.

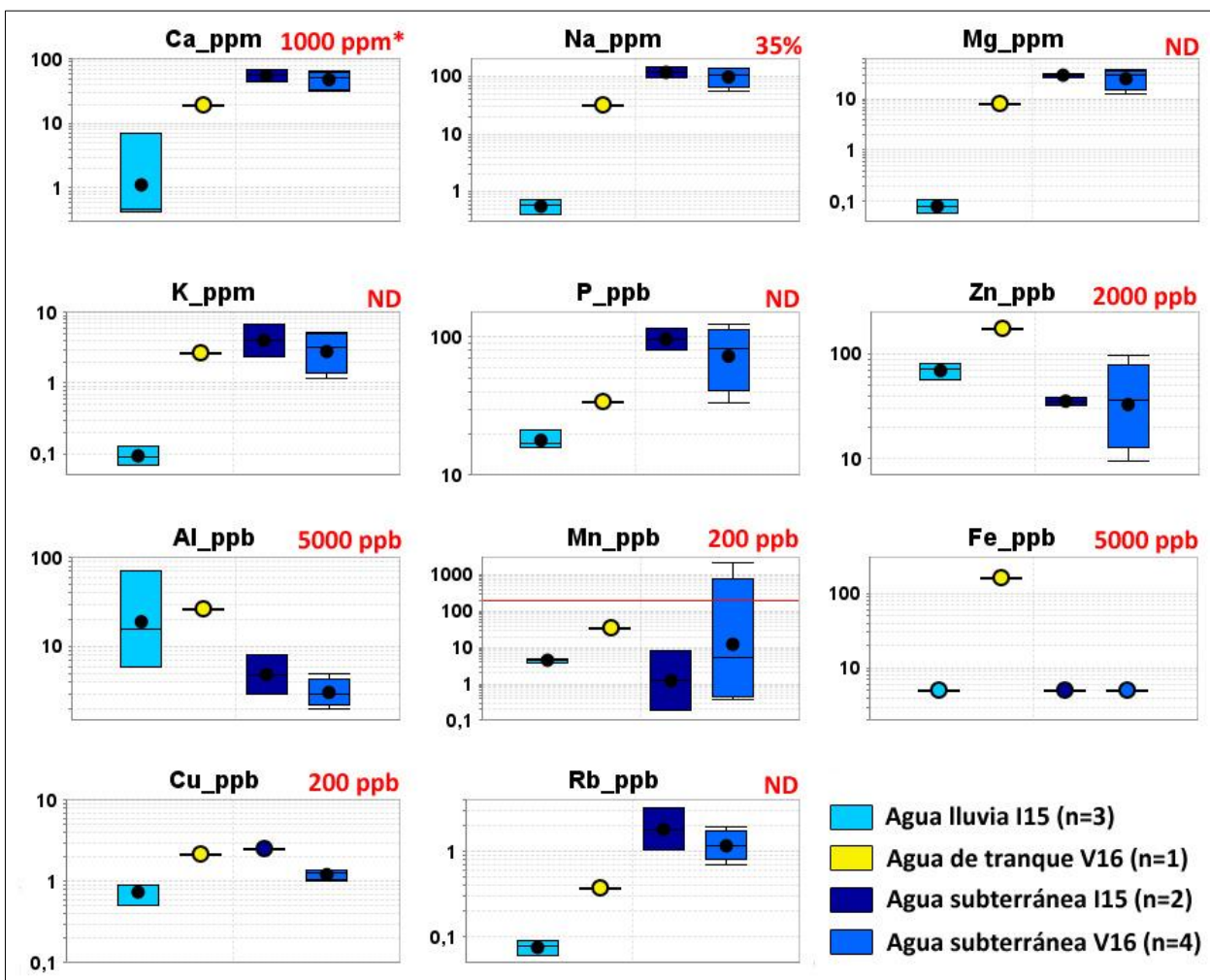


Figura 4.39. Contenidos de nutrientes en escala logarítmica en las muestras de aguas de San Antonio. Valores en rojo corresponden a la Norma chilena N°1333 para aguas de riego (1978).

Los datos de aguas de San Antonio comparados con la Norma chilena para aguas de riego presentan valores inferiores a los límites establecidos, excepto, en un valor anómalo de 2243 ppb de Mn en la muestra de agua subterránea GW-C10, supera al límite establecido de 200 ppb.

Las muestras de aguas de lluvia presentan los más bajos valores de Ca, Na, Mg, K, P, Cu y Rb. Se observa una alta variabilidad en la distribución de los elementos Ca y Al, que está dado por un valor elevado de Ca (7.09 ppm) en la muestra RW-C1 y de Al (72 ppb) en la muestra RW-

C2. Las aguas de lluvia además tienen contenidos levemente más altos a similares con las aguas subterráneas para los nutrientes Zn, Al y Mn (Fig. 4.39).

Por su parte, el agua de tranque posee menores concentraciones de Ca, Na, Mg, P y Rb y mayores valores de Zn, Al, Mn y Fe, respecto a las aguas subterráneas, mientras que los contenidos de K y Cu en el agua de tranque se encuentran en similares concentraciones con estas aguas (Fig. 4.39).

Para las aguas subterráneas medidas en ambas temporadas, se reconoce en general, que éstas presentan las mayores concentraciones de Ca, Na, Mg, P y Rb, en relación al resto de las matrices de aguas, por el contrario, estas muestras también poseen los más bajos contenidos de Zn, Al y Mn, además Fe no muestra respuesta analítica (Fig. 4.39). En cuanto a diferencias entre temporadas, la más evidente se da para Cu, elemento que es mayor en las aguas subterráneas muestreadas en invierno de 2015, sin embargo, esta misma característica, pero con menores diferencias entre los valores promedios de ambas temporadas se observa para la mayoría de los nutrientes, tales como Ca, Na, Mg, K, P Al y Rb (Fig. 4.39).

#### **4.5.5.3 Metales en aguas de San Antonio**

Los resultados de las mediciones de metales en aguas se presentan en detalle y en promedio para las matrices agua de lluvia, agua de tranque y aguas subterráneas de las temporadas I15 y V16 en la tabla A4.26 (Anexos) y en la figura 4.40. Los metales con respuesta analítica para al menos una muestra de agua, corresponden a: Zn, Cu, Pb, As, Sb, Cr, Ni, Sn, Mo y Au.

La comparación de las concentraciones de metales obtenidos en las muestras de aguas de San Antonio con la Norma chilena de aguas de riego, indica que los datos se encuentran todos bajo los parámetros establecidos.

Las aguas de lluvias presentan los menores valores de Cu, además los metales As, Mo y Au no muestran respuesta analítica para estas aguas. Por el contrario, el elemento Pb tiene respuesta solamente para la muestra RW-C2, aunque en muy baja concentración. El Zn en aguas de lluvia es mayor que en las aguas subterráneas y el Sn posee mayores valores que el agua de tranque y las aguas subterráneas V16. Por otra parte, los elementos Cr, Ni y Sb están en baja concentración en las aguas de lluvia, con algunas muestras que superan el límite de detección analítica.

El agua de tranque analizada en el verano 2016 tiene las mayores concentraciones de Zn, As, Ni, Sb y Au, respecto al resto de matrices de aguas consideradas, mientras que posee las más bajas contenidos de Sn y el Mo medido es inferior al de aguas subterráneas. Por último el Cr

presenta un alta concentración en el agua de tranque, aunque esta es menor a lo registrado en las aguas subterráneas de I15.

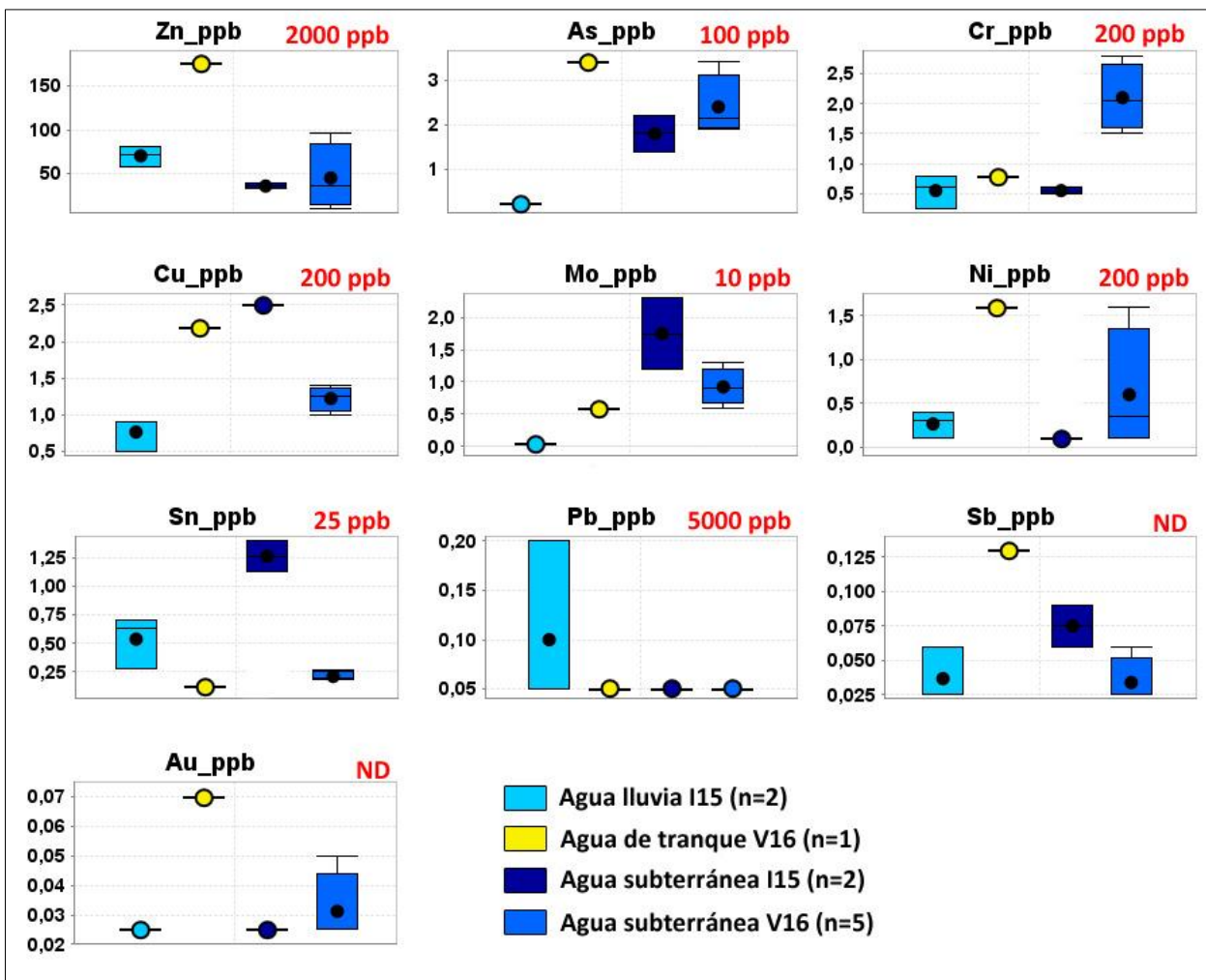


Figura 4.40. Contenidos de metales en las muestras de aguas de San Antonio. Valores en rojo corresponden a la Norma chilena N°1333 para aguas de riego (1978).

En las aguas subterráneas el Zn muestra las menores concentraciones en ambas temporadas de medición, así como el Mo es mayor en estas aguas, en relación a las otras matrices. Sin embargo, el aspecto más característico en los contenidos de metales es la notoria diferencia que existe entre ambas estaciones de medición. Particularmente, Cu, Mo y Sn poseen las mayores concentraciones en las aguas subterráneas muestreadas en I15, así como también Sb tiene mayores valores en invierno que en verano en las aguas subterráneas. Por el contrario, Zn, As, Cr, Ni y Au muestran mayores valores en las aguas subterráneas de V16.



#### 4.5.6 PERFILES DE SUELOS SELECCIONADOS EN SAN ANTONIO

En San Antonio se seleccionan las calicatas CT-1 y CT-6 en el cuartel Terraza y las calicatas CP-10 y CP-12 en el cuartel Pendiente, además del suelo blanco o no cultivado C-13 (Fig. 4.41). Por otra parte, para análisis químicos y físicos también se consideran los perfiles CT-5 y CT-8.

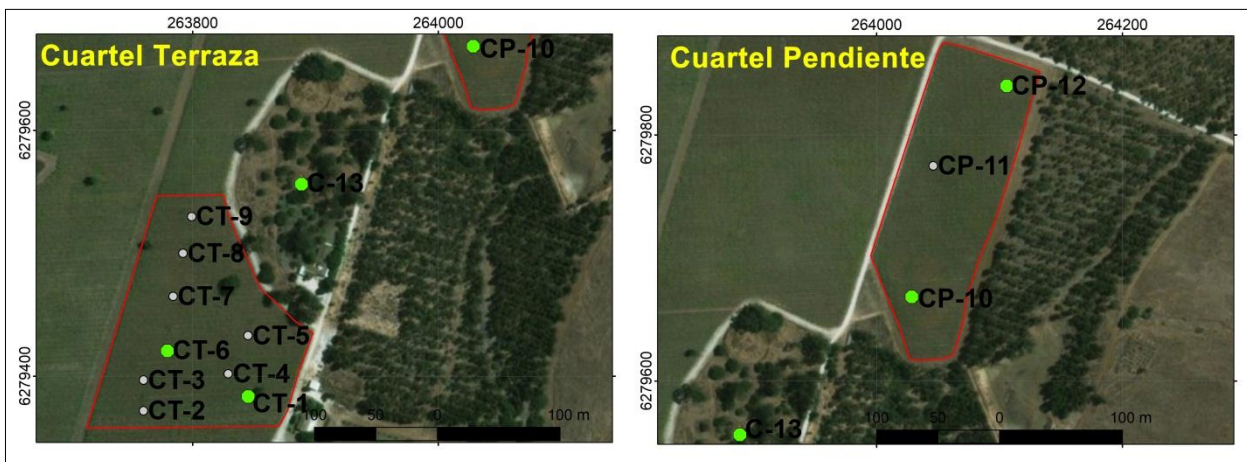


Figura 4.41. Ubicación de calicatas seleccionadas (puntos verdes) en la viña de San Antonio.

##### 4.5.6.1 Mineralogía en roca y fracción limo-arcilla en suelos de San Antonio

La mineralogía de la roca parental y los suelos de San Antonio semicuantificada a través de la lectura por difracción de rayos X (DRX) de la fracción limo-arcilla se presentan en la tabla A.27 (Anexos) y en la figura 4.42.

La roca arenisca obtenida del horizonte C2 de la calicata CP-12 se considera como roca parental para esta viña. Ésta posee una mineralogía cercana a 65% de plagioclasa (Pg), con aproximadamente 6% de cuarzo (Qz), 12% de actinolita (Act) y contenidos próximos a 7% de feldespato potásico (Feld. K) y caolinita (Cao), con menores proporciones (~2%) de arcillas del grupo de la esmectita (Esm). Además esta arenisca se contrasta con la muestra CT-1C, que corresponde a una arenisca bien preservada del horizonte C del cuartel Terraza, que presenta cerca de 60% de Pg, con 10-11% de Qz, illita (Ill) y calcita (Cal), estos dos últimos no se reconocen en la arenisca CP-12D; además posee menores contenidos (~1%) de Esm y Act y no se reconoce Cao ni Feld. K (Fig. 4.42). La presencia de calcita, indica una diferencia importante entre ambas rocas parentales, lo que puede afectar a condiciones fisicoquímicas y geoquímicas de los suelos que se desarrollan a partir de éstas.

Los suelos del cuartel Terraza muestran, en general, un menor porcentaje de Pg y una mayor proporción de Qz, que la roca parental CP-12D. Esta diferencia es relativa y puede estar dada

por la alteración y disolución de Pg, puesto que en la arenisca CT-1C, los contenidos de Pg y Qz son similares a los de la roca parental (Fig. 4.42). De este modo, los perfiles de suelos analizados en este cuartel muestran una abundancia relativa de  $Pg > Qz > Illi > Act > Cal > Feld. K$ , con bajo contenido de Chl y Esm. Además en los suelos del perfil CT-6 no se observa Feld. K (Fig. 4.42).

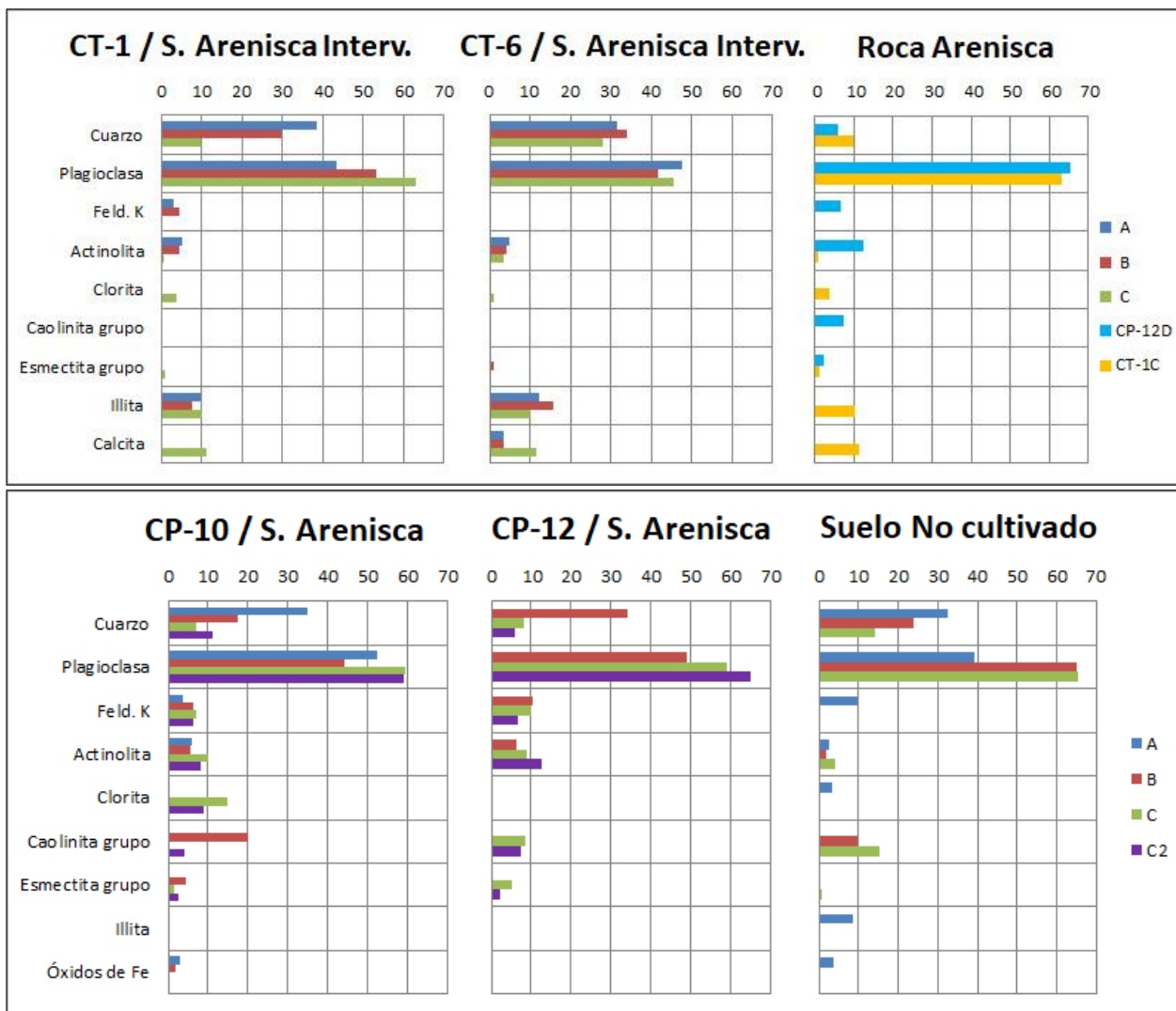


Figura 4.42. Gráficos de barra con la mineralogía presente en la roca parental y en los horizontes A, B, C y C2 de los perfiles de suelo seleccionados en San Antonio: (arriba) CT-1 y CT-6 del cuartel Terraza y roca arenisca de CP10D; (abajo) CP-10 y CP12 del cuartel Pendiente y C-13 del suelo No cultivado.

En el cuartel Pendiente los suelos tienen una mineralogía análoga a la roca parental, con proporciones muy similares en los horizontes C y C2 (Fig. 4.42). En los horizontes superiores se destaca el aumento de Qz y la disminución de Pg y Act. Particularmente, en el perfil CP-10 se reconoce, en los horizontes A y B, una disminución de Feld. K y aparición de magnetita (Mag), además aparición de clorita en los horizontes C y C2 y aumento en el horizonte B de Cao y Esm. En el perfil CP-12, en cambio, se registra ausencia de Chl en todos los horizontes,

además se observa en el horizonte B, un leve aumento relativo de Feld. K, mientras que desaparecen completamente las arcillas Cao y Esm. (Fig. 4.42).

El suelo no cultivado (C-13) registra en el horizonte C la existencia de más de 65% de Pg y aproximadamente 15% de Qz y Cao, con menor porcentaje de Act y trazas de Esm. En el horizonte B se reconoce un aumento relativo de Qz y una leve disminución de Pg, Act y Cao. Finalmente, en el horizonte A se presenta una proporción cercana de Qz y Pg (30-40%), desaparición de Cao, aumento de Act y aparición de Hematita (Hm), Illi, Chl y Feld. K (Fig. 4.42).

#### 4.5.6.2 Mineralogía de arcillas en San Antonio

La mineralogía de la fracción arcillas de los suelos para la caracterización y semicuantificación de filosilicatos, se exponen en la tabla A4.28 (Anexos) y en la figura 4.43.

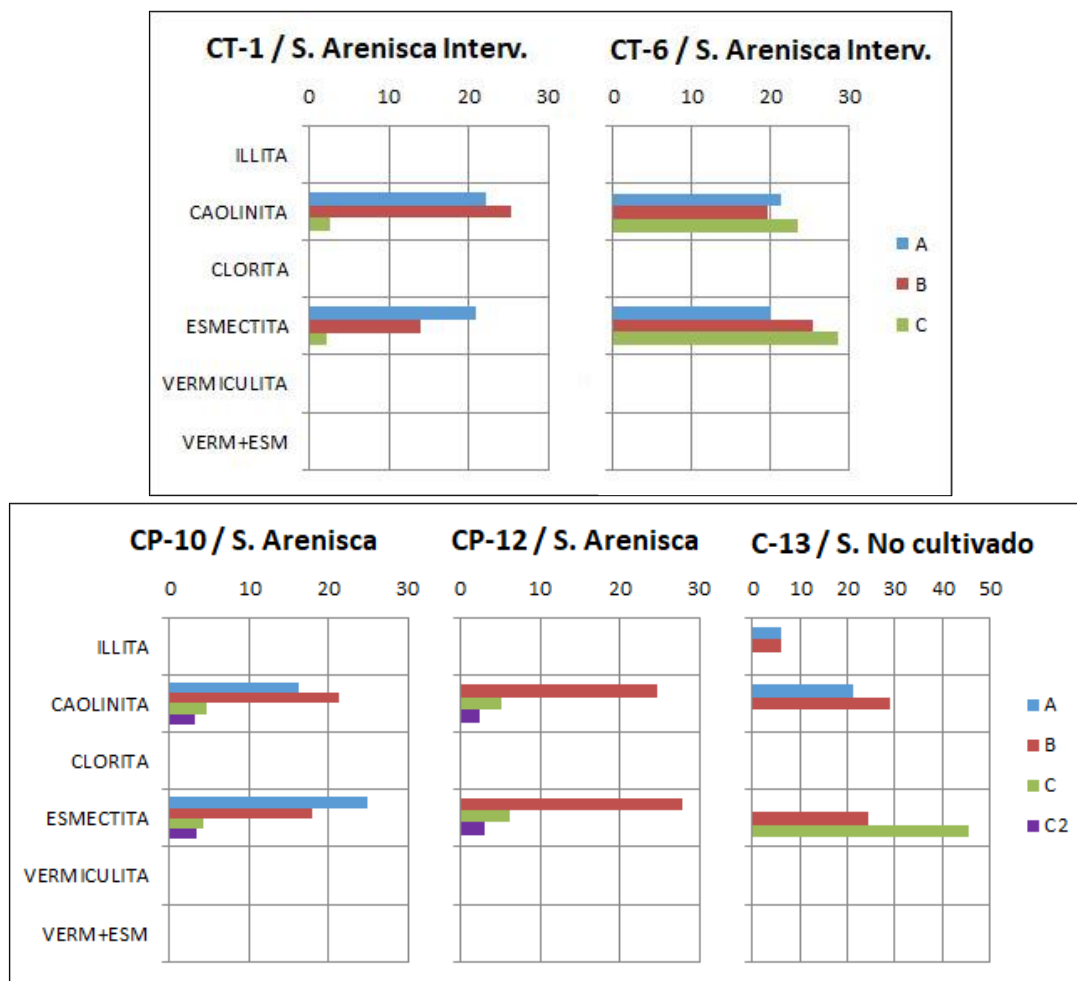


Figura 4.43 Gráficos de barra con la mineralogía de filosilicatos (arcillas) en los horizontes A, B, C y C2 en perfiles de suelos seleccionados de San Antonio: (arriba) CT-1 y CT-6 del cuartel Terraza (abajo) CP-10 y CP12 del cuartel Pendiente y C-13 del suelo No cultivado. Resultados obtenidos de Salgado (2019).

Las rocas parentales (CP-12D y CT-1C) presentan una baja proporción (2-3%) de caolinita (Cao) y esmectita (Esm), estos mismos filosilicatos son los únicos reconocidos en los suelos cultivados de San Antonio. La illita que se reconoce en la fracción limo-arcilla de la arenisca CT-1C y en los suelos del cuartel Terraza, no se registra al analizar la fracción arcilla.

Específicamente, en las calicatas seleccionadas del cuartel Terraza, se observan diferencias en la abundancia de Cao y Esm, por una parte, en los horizontes A y B del perfil CT-1, aumenta considerablemente la proporción de Cao (22 y 25%) y Esm (21 y 20%), respecto al horizonte C. Por el contrario en el perfil de suelo CT-6, en que la arenisca del horizonte C se encuentra más alterada (Fig. 4.26), el porcentaje de Cao y Esm es, en general, alto (20-29%) en todos los horizontes de suelo (Fig. 4.43).

Similar al perfil CT-1, en el cuartel Pendiente, los suelos muestran un bajo porcentaje (2-6%) de Cao y Esm en los horizontes C y C2, proporción que aumenta considerablemente (16 a 18%) en los horizontes B y A para ambas arcillas.

Por último, las arcillas presentes en el suelo no cultivado, muestra notorias diferencias con los suelos cultivados, que es reflejo de la variación del material parental. En este suelo se reconoce únicamente un 46% de esmectita en el horizonte C, en el horizonte B se miden porcentajes similares (29 y 24%) de Cao y Esm y la aparición de un 6% de illita. En el horizonte A desaparece la Esm y se mantiene Cao e Illi (Fig. 4.43).

#### **4.5.6.3 Propiedades físicas y químicas del suelo en San Antonio**

Los perfiles de suelo seleccionados en el cuartel Terraza (CT-1, CT-5, CT-6 y CT-8) tienen en general, una textura arcillosa a franco arcillosa, con porcentajes de partículas tamaño arcilla, en los horizontes A y B, entre 39 a 52% y con 16 a 26% de arena (Fig. A4.4; Anexos); sin embargo, en las calicatas CT-1 y CT-8, el horizonte C, que es donde mejor se reconoce preservada la arenisca parental (Fig. 4.25), tiene una textura franco arenosa (Tabla A4.29; Anexos), con alto porcentaje de arena (66-68%) y bajo contenidos de arcilla (4-5%). La densidad aparente ( $D_a$ ) es levemente menor en los horizontes de textura franco arenosa (1,71-1,74 g/cc), mientras que para los horizontes con suelos arcillosos a franco arcillosos la  $D_a$  es mayor y varía entre 1,76 a 1,82 g/cc (Tabla A4.29; Anexos). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es en promedio más alta en el horizonte B (26,2 meq/100g), respecto a los horizontes A (19,1 meq/100g) y C (17,6 meq/100g). Del mismo modo, la materia orgánica (MO) va disminuyendo en promedio desde 1,47% en el horizonte A, a 0,91% en el B y hasta 0,18% en el horizonte C (Fig. 4.44 y Tabla 4.6).



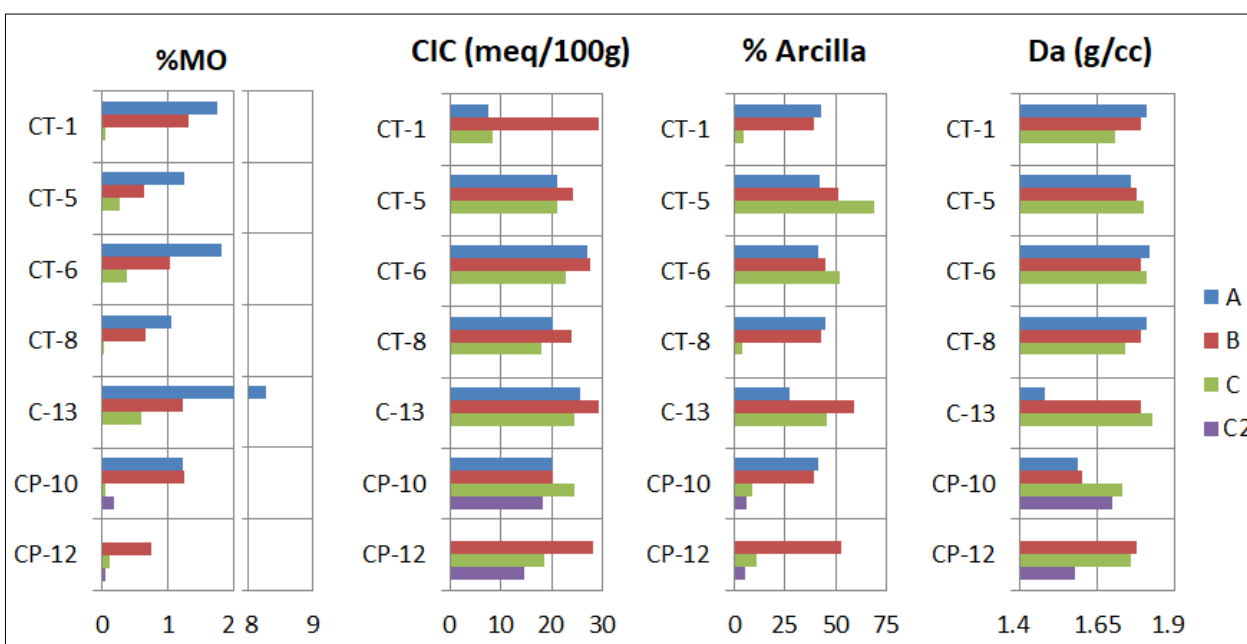


Fig. 4.44. Contenido de materia orgánica (%MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), arcillas (% Arcilla) y densidad aparente (Da) en siete suelos seleccionados y en los horizontes A, B, C y C2 en San Antonio.

Tabla 4.6 Estadísticas del contenido de materia orgánica (%MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los suelos seleccionados de los cuarteles Terraza (CT) y Pendiente (CP) y en el perfil del suelo blanco C-13 (no cultivado), datos en general y por horizontes. Viña de San Antonio.

	% MO			CIC (meq/100g)		
	Blanco (C-13)	Terraza (CT)	Pendiente (CP)	Blanco (C-13)	Terraza (CT)	Pendiente (CP)
Max	8.28	1.81	1.25	29.2	29.2	28.2
Min	0.59	0.01	0.06	24.6	7.6	14.6
Rango	7.69	1.80	1.19	4.6	21.6	13.6
Media	<b>3.37</b>	<b>0.85</b>	<b>0.52</b>	<b>26.4</b>	<b>21.0</b>	<b>20.7</b>
Desv. Est.	4.27	0.62	0.54	2.44	6.84	4.43
$\bar{X}$ Horiz A	<b>8.28</b>	<b>1.47</b>	<b>1.22</b>	<b>25.5</b>	<b>19.1</b>	<b>20.3</b>
$\bar{X}$ Horiz B	<b>1.23</b>	<b>0.91</b>	<b>1.00</b>	<b>29.2</b>	<b>26.2</b>	<b>24.3</b>
$\bar{X}$ Horiz C	<b>0.59</b>	<b>0.18</b>	<b>0.09</b>	<b>24.6</b>	<b>17.6</b>	<b>21.6</b>
$\bar{X}$ Horiz C2	--	--	<b>0.12</b>	--	--	<b>16.4</b>

Por otra parte en el cuartel Pendiente, las calicatas (CP-10 y CP-12) muestran una textura arcillosa a franco arcillosa en los horizontes A y B (Tabla A4.29), con porcentajes de arcilla entre 53 y 39%, y una textura franco arenosa en los horizontes C y C2, con un aumento a 65 a 88% de arena (Fig. A4.4; Anexos) y una importante disminución en el porcentaje de arcillas (5 a 9%). La Da en los suelos de este cuartel no sigue el mismo patrón respecto a la textura, baja Da en los horizontes arcillosos A y B del perfil CP-10 (1,50 y 1,60 g/cc, respectivamente) y mayor densidad en los horizontes franco arenosos C y B (1,73 y 1,60 g/cc, respectivamente), por el contrario el perfil CP-12, presenta mayor Da en el horizonte B arcilloso (1,78 g/cc) pero similar en el horizonte C franco arenoso (1,76 g/cc) y una Da baja de 1,58 g/cc en el horizonte C2 areno francoso (Tabla A4.29; Anexos).

La capacidad de intercambio catiónico son en promedio mayores en los horizontes B y C (24,3 y 21,6 meq/100g) y disminuyen en el horizonte A y C (Tabla 4.6). Finalmente el contenido de MO es en promedio menor a lo registrado en el cuartel Pendiente, con mayores medias en los horizontes A y B (1,22 y 1,0%) y muy bajos contenidos promedios de 0,09 y 0,12% en los horizontes C y C2, respectivamente (Fig. 4.44).

Finalmente, el perfil de suelo no cultivado C-13, que está formado sobre un banco de conglomerado, presenta textura franco arcilloso a arcilloso, con un alto porcentaje de materia orgánica en el horizonte A (8.28%) que concuerda con la Da más baja (1,48 g/cc) de los suelos de San Antonio (Tabla A4.29; Anexos), además se miden altos contenidos de MO en los horizontes B y C (1,23 y 0,59%, respectivamente). La CIC es más alta en el horizonte B (29,2 meq/100g) respecto a los horizontes A y C (25,5 y 24,6 meq/100g), coincidente con un mayor contenido de arcilla en el horizonte B (Fig. A4.4; Anexos).

## 4.6 RESULTADOS VIÑA DE SANTA CRUZ

### 4.6.1 GEOLOGÍA A ESCALA DE CUARTEL (1:5.000) EN SANTA CRUZ

En esta viña se consideran los cuarteles “Isla”, con nueve calicatas, y “Pendiente”, con tres calicatas. En el cuartel Isla se estudian los perfiles LI-1 a LI-9, mientras que en el cuartel Pendiente se analizan las calicatas LP-10 a LP-12. En zonas directamente aledañas a los cuarteles Isla y Pendiente, se localizan respectivamente, la calicata LI-13 y LP-14, que corresponden a suelos ubicados en zonas no cultivadas. Los perfiles de suelo tienen profundidades que varían entre 90 a 142 cm.

#### 4.6.1.1 Cuartel Isla (LI), Santa Cruz

El cuartel Isla posee aproximadamente 4,3 ha de superficie. Corresponde a un sector plano que está demarcado por dos quebradas (Fig. 4.45). El material parental de este suelo es un depósito aluvial de gran envergadura, disectado por paleocanales fluviales, por lo que en términos generales se clasifica a este depósito semiconsolidado como fluvio-aluvial.

En los perfiles de suelo de este cuartel se observan pocas variaciones entre las calicatas (LI-1 a LI-4 y L-6 a L-9), al igual que entre los horizontes del suelo (Fig. 4.46). La fracción mineral se compone principalmente por partículas tamaño arena media a gruesa, correspondiente al material erosionado desde los cerros aledaños, conformado mayormente por una Granodiorita de biotita y hornblenda (Contreras *et al.* 2015).



Figura 4.45. Cuartel Isla de la viña de Santa Cruz (A) Contexto geomorfológico del cuartel. Imagen obtenida desde Google Earth. (B) Mapa geológico a escala cuartel.

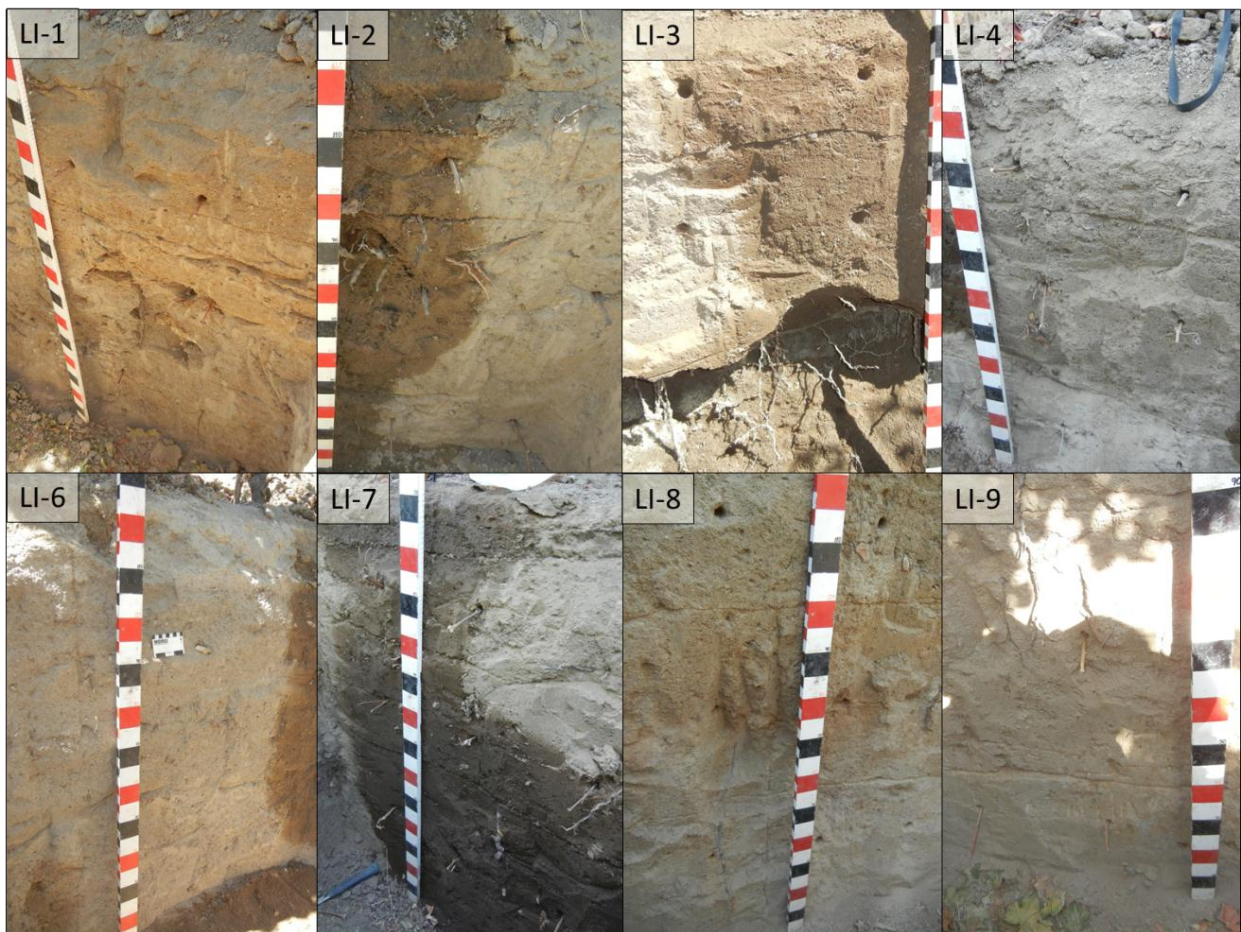


Figura 4.46. Calicatas LI-1, LI-2, LI-3, LI-4, LI-6, LI-7, LI-8 y LI-9 del cuartel Isla en viña de Santa Cruz, cuyo material parental corresponde a un depósito fluvio-aluvial.



Localmente, en la calicata LI-5, se observan clastos semiangulosos de mayores dimensiones (15 a 20 cm), los que representan la presencia de paleocanales de baja capacidad de transporte (Figs. 4.47A y 4.47B). Algunos de estos clastos son de origen volcánico (Fig. 4.47C) lo que indica la presencia de rocas de este origen en las partes altas de los cerros, lo cual no fue reconocido en terreno, pero es reportado en Godoy *et al.* (2006). Por otra parte, la calicata blanco LI-13 (Fig. 4.47D) de este cuartel, ubicada cerca de la calicata LI-8 (Fig. 4.45B), presenta características muy similares a las calicatas de suelo cultivado.

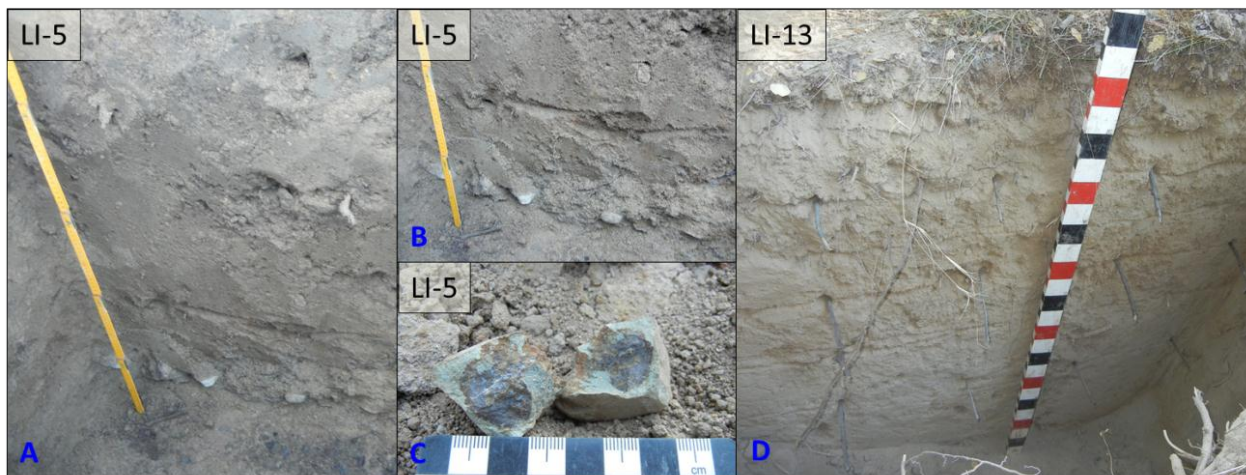


Figura 4.47. (A) Calicata LI-5 del cuartel Isla en viña de Santa Cruz. (B) Detalle fotografía A, mostrando capa de clastos angulosos interpretada como un paleocanal. (C) Presencia de clastos volcánicos en paleocanal. (D) Calicata LI-13 calicata blanco del cuartel Isla en viña de Santa Cruz.

#### 4.6.1.2 Cuartel Pendiente (LP), Santa Cruz

El cuartel Pendiente, de aproximadamente 1 ha de superficie, presenta una pendiente fuerte y ondulada, de 6° a 22° (Fig. 4.48A). En los perfiles de suelo cultivado LP-10 y LP-12, así como en el perfil de suelo blanco LP-14, se reconoce el desarrollo de suelo directamente sobre la roca (Fig. 4.49), la que corresponde a una Granodiorita de biotita y hornblenda (Contreras *et al.* 2015). Por otra parte, la calicata LP-11 se ubica sobre una zona de menor pendiente, en donde se ha acumulado un depósito coluvial, formado por el material erosionado y transportado gravitacionalmente y que tiene, por tanto, características composicionales monomíticas (granodiorita), con presencia de sedimentos y bloques redondeados a semiangulosos (Fig. 4.49).

#### 4.6.2 FISICOQUÍMICA DE SUELOS EN SANTA CRUZ

Los principales estadígrafos básicos de las condiciones fisicoquímicas de los suelos de Santa Cruz para las cuatro temporadas de medición se presentan en la tabla 4.7. Además en la tabla A4.30 (Anexos) se expone la fisicoquímica medida en los horizontes de cada perfil de suelo.





Figura 4.48. Cuartel Pendiente de la viña de Santa Cruz (A) Contexto geomorfológico del cuartel. Imagen obtenida desde Google Earth. (B) Mapa geológico a escala cuartel.



Figura 4.49. Calicatas LP-10, LP-12 y LP-14 mostrando un suelo desarrollado in-situ sobre la roca y calicata LP-11 con un depósito coluvial como material parental. Cuartel Pendiente en viña de Santa Cruz.

Tabla 4.7. Estadísticas básicas de las condiciones fisicoquímicas del suelo medidas en cuatro temporadas en la viña de Santa Cruz.

Viña		pH	CE mS/cm	T° °C	Eh mV	Estadística	pH	CE mS/cm	T° °C	Eh mV	
Santa Cruz	Invierno 2014	5,10	0,07	13,3	nd	<b>Promedio</b>	6,2	0,07	9,1	242	Invierno 2015
		5,80	0,00	8,9	nd	<b>Máximo</b>	7,73	0,26	12,2	296	
		4,31	0,31	22,7	nd	<b>Mínimo</b>	5,28	0	4,7	183	
		0,37	0,05	3,9	nd	<b>Desv. est.</b>	0,52	0,05	1,3	26	
		18	155	160	0	<b>n</b>	170	170	170	43	
	Verano 2015	5,59	0,03	23,8	nd	<b>Promedio</b>	6,96	0,01	21,9	262	Verano 2016
		7,57	0,18	39,7	nd	<b>Máximo</b>	8,61	0,22	32,8	333	
		3,46	0,00	17,5	nd	<b>Mínimo</b>	5,76	0	15,2	231	
		0,71	0,04	3,9	nd	<b>Desv. est.</b>	0,56	0,03	3,2	18	
		148	148	148	0	<b>n</b>	170	170	170	43	

El pH de Santa Cruz se mide en las cuatro temporadas, sin embargo, en Invierno 2014 sólo se midieron dos calicatas por falla del equipo, por tanto, las estadísticas se determinan con un bajo número de muestras ( $n_{I14}=18$ ). De este modo, las condiciones de pH en el suelo varían de ácido a neutro a lo largo de las cuatro temporadas de medición, desde un promedio de 5,10 en I14, aumentando en el verano de 2015 a un pH medio de 5,59, hasta alcanzar un pH promedio de 6,2 en I15 y 6,96 en V16 (Figs. 4.50A y 4.50B). Esto se correlaciona con el encalamiento del suelo que se realiza en esta viña, a partir de la primera campaña de medición (Invierno 2014).

Las mediciones de temperatura y CE se miden en todas las temporadas de estudio. Al igual que en las viñas de Casablanca y San Antonio, los mayores valores de CE se miden en los inviernos, con valores medios comparables entre sí ( $\bar{x}_{I14}=\bar{x}_{I15}=0,07$  mS/cm), por su parte, el promedio de CE en Verano 2015 ( $\bar{x}_{V15}=0,03$  mS/cm) es estadísticamente mayor a los medidos en Verano 2016 ( $\bar{x}_{V16}=0,01$  mS/cm) (Figs. 4.50C y 4.50D).

La temperatura del suelo es obviamente mayor en las temporadas de verano, respecto a las temporadas de invierno (Figs. 4.50E y 4.50F). Determinando que las temperaturas promedio más altas se registran en Verano 2015 ( $\bar{x}_{V15}=23,8^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{x}_{V16}=21,9^{\circ}\text{C}$ ), mientras que en I15 se miden las menores temperaturas medias ( $\bar{x}_{I15}=9,1^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{x}_{I14}=13,3^{\circ}\text{C}$ ).

Por último, el Eh se mide en las temporadas Invierno 2015 y Verano 2016, registrando un valor promedio estadísticamente superior en la temporada V16 ( $\bar{x}_{V16}=+262$  mV;  $\bar{x}_{I15}=+242$ mV), aunque con una mayor dispersión de los datos en I14 (Figs. 4.50G y 4.50H).

### 4.6.3 GEOQUÍMICA DE LOS SUELOS DE SANTA CRUZ

La geoquímica de los suelos de la viña de Santa Cruz se divide según los dos cuarteles en estudio y las diferencias en los materiales parentales sobre los cuales se desarrollan los suelos. En el cuartel Isla (LI) se reconoce suelo cultivado ( $n=27$ ) y no cultivado ( $n=3$ ), ambos desarrollados sobre un Depósito fluvioaluvial de composición monomíctica. En el cuartel Pendiente (LP), tres tipos de suelos son considerados, suelo cultivado ( $n=6$ ) y no cultivado ( $n=3$ ) formado *insitu* sobre una Granodiorita y suelo coluvial ( $n=4$ ) de composición granodiorítica monomíctica.

#### 4.6.3.1 Nutrientes en suelo total en Santa Cruz

Los resultados de la química total de los diferentes suelos de la viña de Santa Cruz son presentados por medio de los estadígrafos básicos en la tabla A4.31 (Anexos) y la distribución estadística en la figura 4.51.

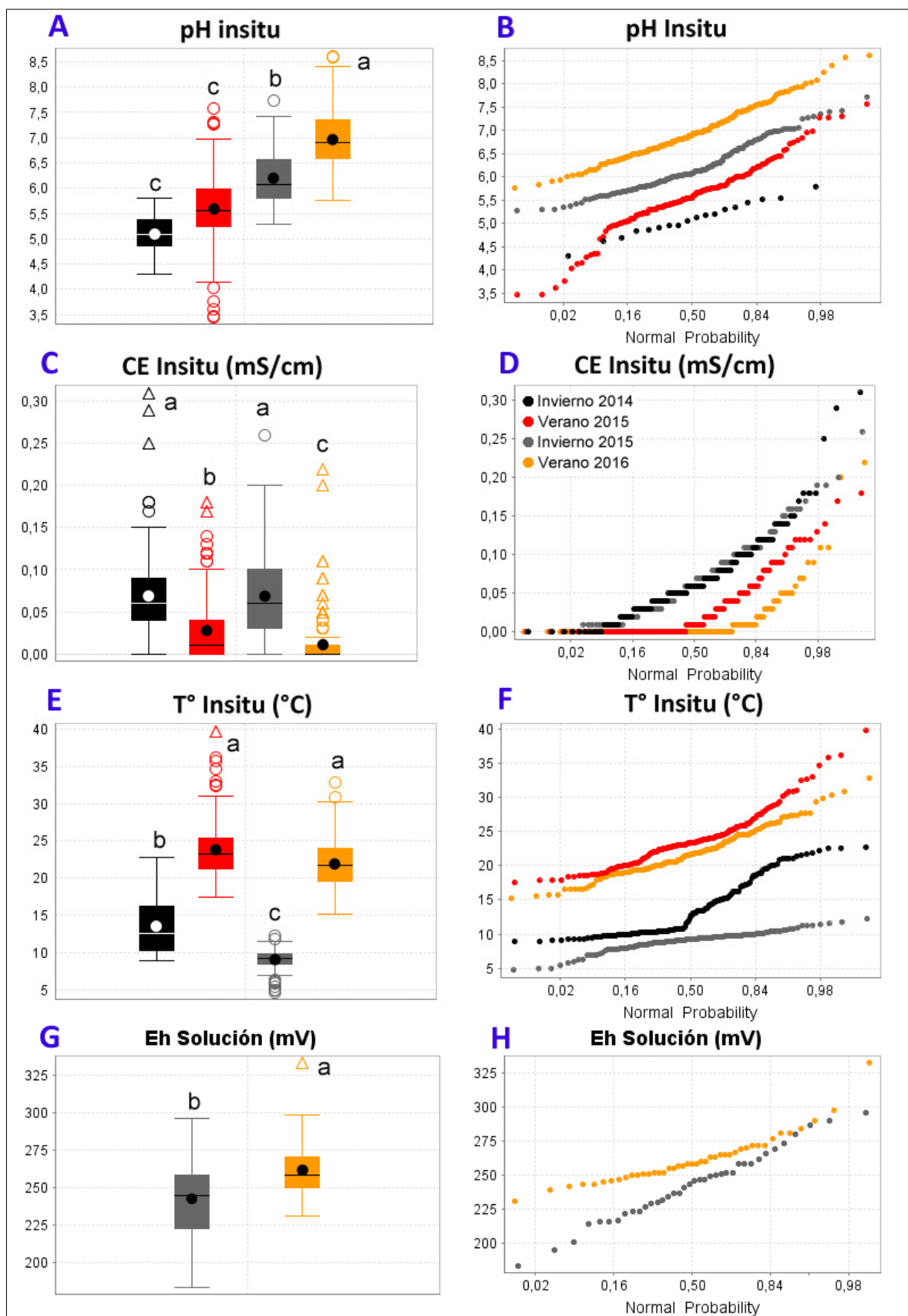


Figura 4.50. Gráficos de caja y de probabilidad con los parámetros fisicoquímicos medidos en las cuatro temporadas en la viña de Santa Cruz. (A-B): pH. (C-D): CE. (E-F): T°. (G-H): Eh. Letras sobre cada barra indican diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza  $p < 0.05$ .



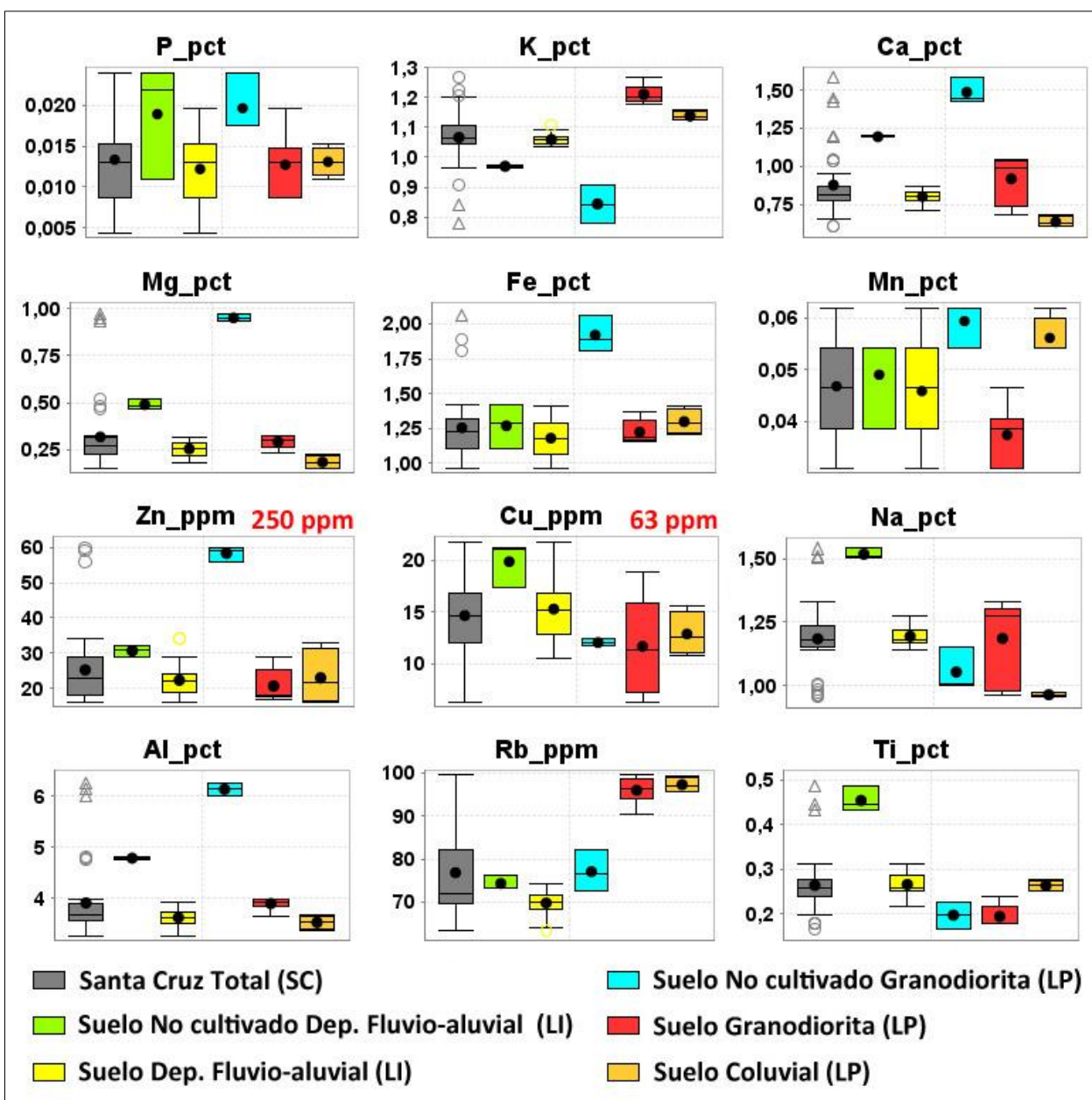


Figura 4.51. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes en suelo total de los materiales parentales muestreados en Santa Cruz. Valores en rojo límite en suelos CCME (2016).

Los suelos blanco de ambos cuarteles poseen promedios de P, Ca, Mg, Zn y Al mayores que todos los suelos cultivados y los más bajos valores medios de K. Particularmente, el suelo no cultivado granodiorítico (caja calipso) del cuartel Pendiente (LP) muestra las mayores concentraciones de Ca, Mg, Fe, Zn y Al, además de los más bajos valores de K. Por su parte, el suelo no cultivado del cuartel Isla (fluvioaluvial) tiene los más altos promedios de Ti y Cu (cajas verdes en Fig. 4.51).

Todos los suelos cultivados tienen promedios mayores de K, respecto de los suelos no cultivados, con más altos valores para los suelos del cuartel Pendiente (LP). Para el resto de



nutrientes, no se observan importantes diferencias entre los diferentes tipos de suelos cultivados, excepto para Rb el cual es mayor en ambos suelos del cuartel LP y para Mn que presenta contenidos medios altos en el suelo coluvial (caja naranja) y bajo en el suelo granodiorítico (caja roja), Cobre es mayor en el suelo fluvioaluvial (caja amarilla) del cuartel LI y Ca, Mg y Na es más bajo en el suelo coluvial del cuartel Pendiente (Fig. 4.51).

#### 4.6.3.2 Nutrientes en la fase biodisponible del suelo en Santa Cruz

La distribución estadística de la concentración de los nutrientes en la fase biodisponible de los diferentes suelos de la viña en Santa Cruz, se observan en los diagramas de caja (Fig. 4.52). Los resultados de las estadísticas básicas se encuentran en la tabla A4.32 (Anexos).

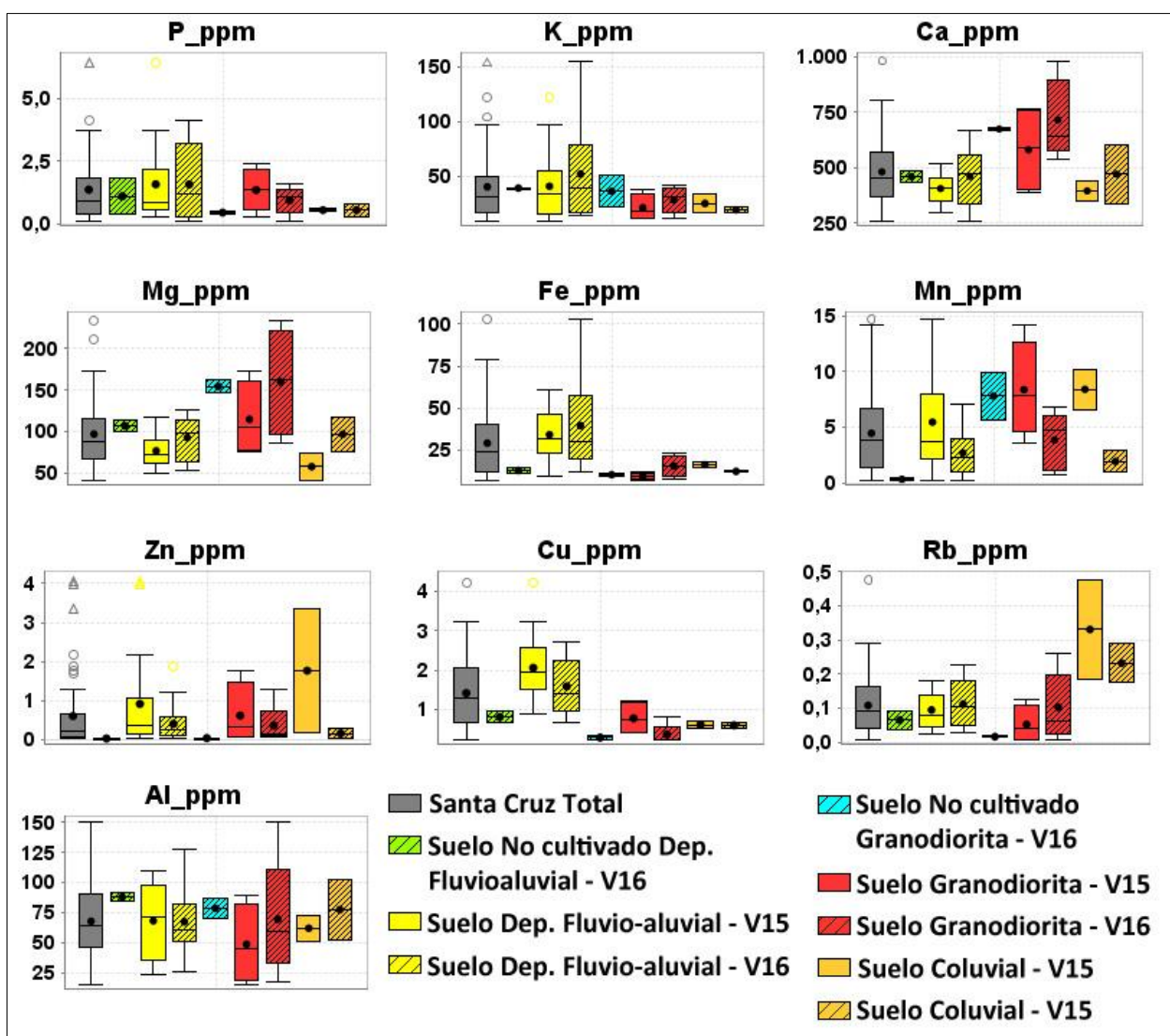


Figura 4.52. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes en la fase biodisponible del suelo en los diferentes materiales parentales muestreados en Santa Cruz.

Los resultados muestran que los suelos no cultivados de ambos cuarteles poseen rangos (valor máximo menos valor mínimo) más acotados, mientras que una mayor dispersión se observa para los suelos cultivados, en ambas temporadas de medición de la fase biodisponible (Fig. 4.52). Además, pocas diferencias se observan en las concentraciones de los nutrientes P, K y Al en la fase biodisponible entre los suelos cultivados y los no cultivados, incluso en general, entre todos los suelos en estudio del suelo (Fig. 4.52).

Zinc y cobre presentan bajos promedios en los suelos blanco, en relación a los suelos cultivados de su respectivo cuartel. Específicamente, el suelo blanco del cuartel Isla (cajas verdes) tiene promedios comparativamente más bajos en Fe, Mn, además de Cu y Zn ya mencionado, aunque presenta mayores promedios de Mg, respecto al suelo fluvioaluvial cultivado (cajas amarillas) del mismo cuartel (Fig. 4.52).

En el cuartel Pendiente (LP), se reconoce alta biodisponibilidad en promedio para Ca y Mg en los suelos desarrollados directamente sobre la roca granodiorita, tanto en el suelo no cultivado (cajas calipso) como en el cultivado (cajas rojas). Además en este mismo cuartel, existen diferencias entre los suelos cultivados, con más bajos promedios en el suelo coluvial (cajas naranjas) de Ca, Mg y P y mayores promedios de Rb, respecto al suelo granodiorítico (cajas rojas; Fig. 4.52).

En cuanto al suelo fluvioaluvial cultivado (cajas amarillas), éste presenta más altos promedios de Fe biodisponible, en ambas temporadas de medición, comparados con todos los otros suelos de Santa Cruz (Fig. 4.52).

Diferencias entre las mediciones de las temporadas verano 2015 (V15) y 2016 (V16) se reconocen para Mn, Zn y Cu los cuales tienen promedios sistemáticamente más altos en la temporada V15, del mismo modo como las medias son mayores para Ca y Mg en la temporada V16 (Fig. 4.52). Cabe recordar que se reconocieron importantes diferencias en el pH de los suelos de ambas temporadas, desde 5,6 en V15 a 7 en V16 (Fig. 4.50A).

#### **4.6.3.3 Metales en suelo total en Santa Cruz**

Los metales considerados en la química total de los suelos de Santa Cruz corresponden desde mayor a menor abundancia relativa a Zn, Cu, Pb, Ni, As, Mo, Sb y Hg. Las estadísticas básicas de la concentración de estos elementos se puede reconocer en la tabla A4.33 (Anexos) y su distribución estadística se representa en gráficos de caja (Fig. 4.53).

A partir de la comparación con la Norma Canadiense se determina que todos los suelos considerados presentan contenidos de metales menores al límite establecido.

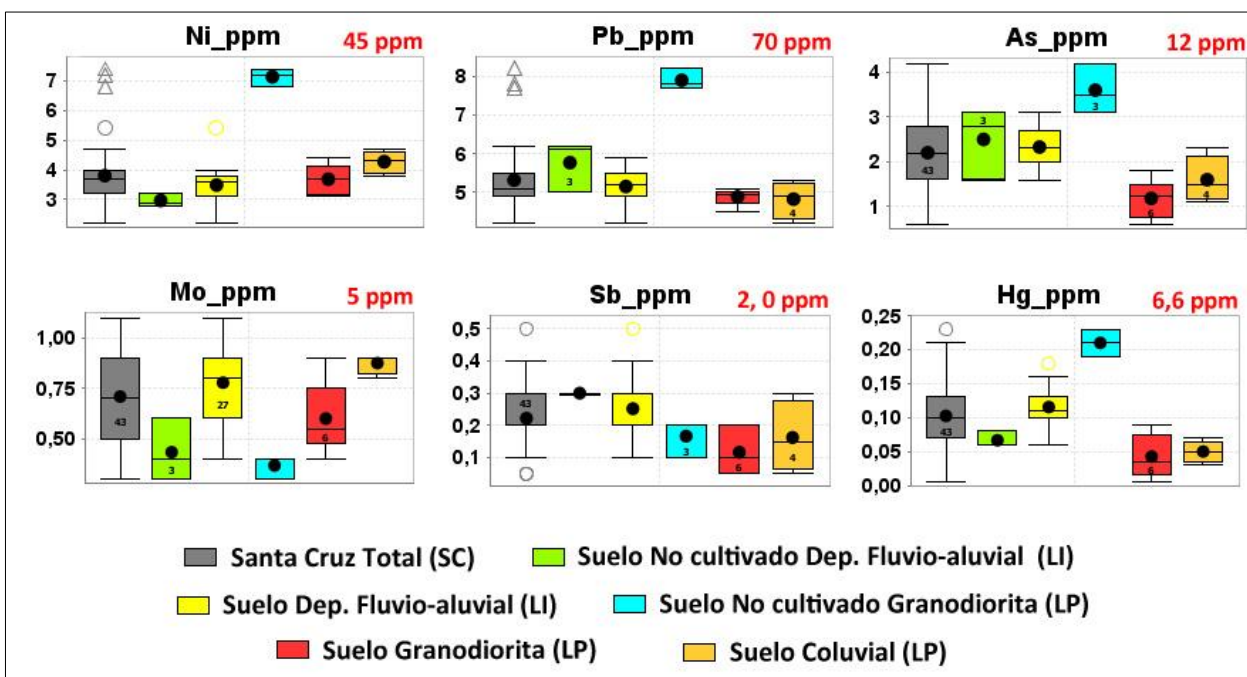


Figura 4.53. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en suelo total de los materiales parentales muestreados en Santa Cruz. Valores en rojo límite en suelos CCME (2016)

Los resultados indican importantes contrastes en los contenidos de metales entre suelos no cultivados y cultivados. Particularmente, mayores promedios de Ni, Pb, As y Hg en los suelos no cultivados del cuartel Pendiente (cajas calipso), respecto a los otros suelos en estudio (Fig. 4.53). Mientras que la media de Cu es más alta en los suelos no cultivados del cuartel Isla (caja verde; Fig. 4.52). Por otra parte, Zn, Cu y Mo muestran el comportamiento opuesto, el promedio en suelos no cultivados es menor a los suelos cultivados (Figs. 4.52 y 4.53).

En cuanto a los suelos cultivados, también se reportan diferencias entre los distintos suelos y cuarteles. Mayores promedios de Cu, As, Sb y Hg en los suelos fluvioaluviales (cajas amarillas) respecto a los suelos del cuartel Pendiente (LP; Figs. 4.52 y 4.53); en este último cuartel se reconocen relativamente mayores promedios en los suelos coluviales (cajas naranjas) que en los suelos granodioríticos (cajas rojas) de Ni, As y Mo (Fig. 4.53).

#### 4.6.3.4 Metales en la fase biodisponible del suelo en Santa Cruz

Las estadísticas básicas de los contenidos de metales biodisponibles en los suelos de Santa Cruz se exponen en la tabla A4.34 (Anexos), por su parte en la figura 4.54 se muestran los gráficos de caja con la distribución estadística de estos elementos.

Al igual que en otros casos, los rangos de las concentraciones de metales biodisponibles en los suelos blancos son más acotados, en contraste a una distribución más dispersa de los valores en suelos cultivados (Fig. 4.54). Específicamente, el suelo no cultivado del cuartel Isla (cajas

verdes) presenta menores promedios en Ni, Pb, Mo, Cd y Hg, respecto a los suelos cultivados del mismo cuartel (cajas amarillas). Por su parte, el suelo granodiorítico no cultivado (cajas calipso) posee contenidos medios menores a los suelos cultivados del cuartel Pendiente, en Mo y Ag (Fig. 4.54).

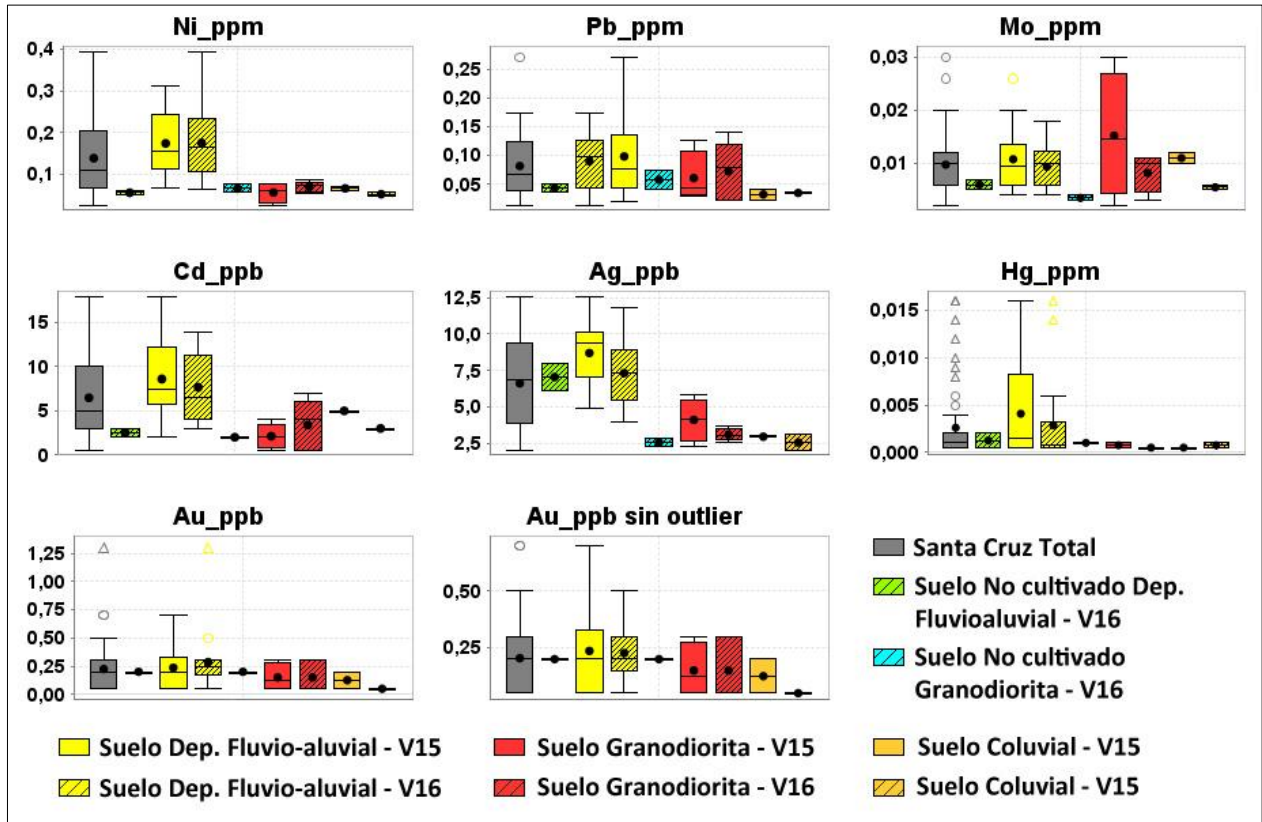


Figura 4.54. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en la fase biodisponible del suelo en los diferentes materiales parentales muestreados en Santa Cruz.

El suelo fluvioaluvial cultivado (cajas amarillas) muestra mayores promedios y alta dispersión en los metales Ni, Pb, Cd, Ag, Hg y Au, respecto a todos los suelos en estudio. Al comparar entre los cuarteles, también se observan mayores medias de Ag y Hg en el cuartel Isla en relación al cuartel Pendiente (Fig. 4.54).

Dentro de los suelos cultivados del cuartel Pendiente (LP) se reconocen mayores concentraciones medias de Pb y Ag en los suelos granodioríticos (cajas rojas) respecto a los coluviales (cajas naranjas). Por último, diferencias entre las temporadas V15 y V16 sólo se observan para Mo y Ag, cuyos valores medios son mayores para todos los suelos cultivados de la temporada Verano 2015 (Fig. 4.54).



#### 4.6.4 QUÍMICA DE FRUTOS EN SANTA CRUZ

En Santa Cruz, la química inorgánica de las bayas de Carmenere se presenta según los cuarteles: Isla (n=9), que posee sus suelos formados sobre el Depósito fluvioaluvial, y Pendiente (n=3), que agrupa a los materiales parentales Granodiorita y Depósito coluvial de composición monomíctica (granodiorítica).

##### 4.6.4.1 Nutrientes en frutos de Santa Cruz

Las estadísticas básicas con los resultados del contenido de nutrientes en las bayas de Santa Cruz se presentan en la tabla A4.35 (Anexos), asimismo los gráficos de caja de la figura 4.55 muestran comparativamente la distribución estadística de los datos.

Los grados brix de las bayas en estudio son mayores, en ambas temporadas, en el cuartel Pendiente (cajas rojas), además se observa una notoria disminución de los grados brix promedio, en ambos cuarteles, durante la temporada V16 (cajas tachadas).

En términos generales, la abundancia relativa de los nutrientes en las bayas de Carmenere de Santa Cruz presenta el siguiente comportamiento:  $K \gg P > Ca > Mg \gg Na \gg Fe > Mn > Rb > Zn > Cu \gg Al$ . La interpretación de los resultados es, en general en Santa Cruz, menos clara que en otras viñas, los contenidos elementos como K, P, Ca, Mg y Na en las bayas de ambos cuarteles y temporadas, muestran alta dispersión de valores y comportamientos variables. Sin embargo, como aspecto común, todos los valores medios son mayores en la temporada V15, lo cual puede estar fuertemente influenciado por los grados brix, que es proporcional al grado de madurez de las bayas.

Particularmente, K muestra valores promedios relativamente mayores en el cuartel Pendiente (cajas rojas; Fig. 4.55), con menores promedios en la temporada V16, similar a los resultados de grados brix, previamente discutidos. El nutriente P, muestra un comportamiento particular en ambos cuarteles, con una alta dispersión de valores en el cuartel Pendiente y valores de P con un rango más acotado en el cuartel Isla (cajas amarillas), además para cada cuartel se observa también una disminución en los contenidos medios durante la temporada V16 (cajas tachadas).

Los nutrientes Ca, Na, Fe y Cu muestran promedios mayores o levemente mayores, en algunos casos, en las bayas del cuartel Isla (cajas amarillas) y también mayores valores durante el verano 2015. En especial, Fe y Cu, tienen un comportamiento similar en el viñedo, con las mayores concentraciones medias en el cuartel Isla durante la temporada V15 (Fig. 4.55).

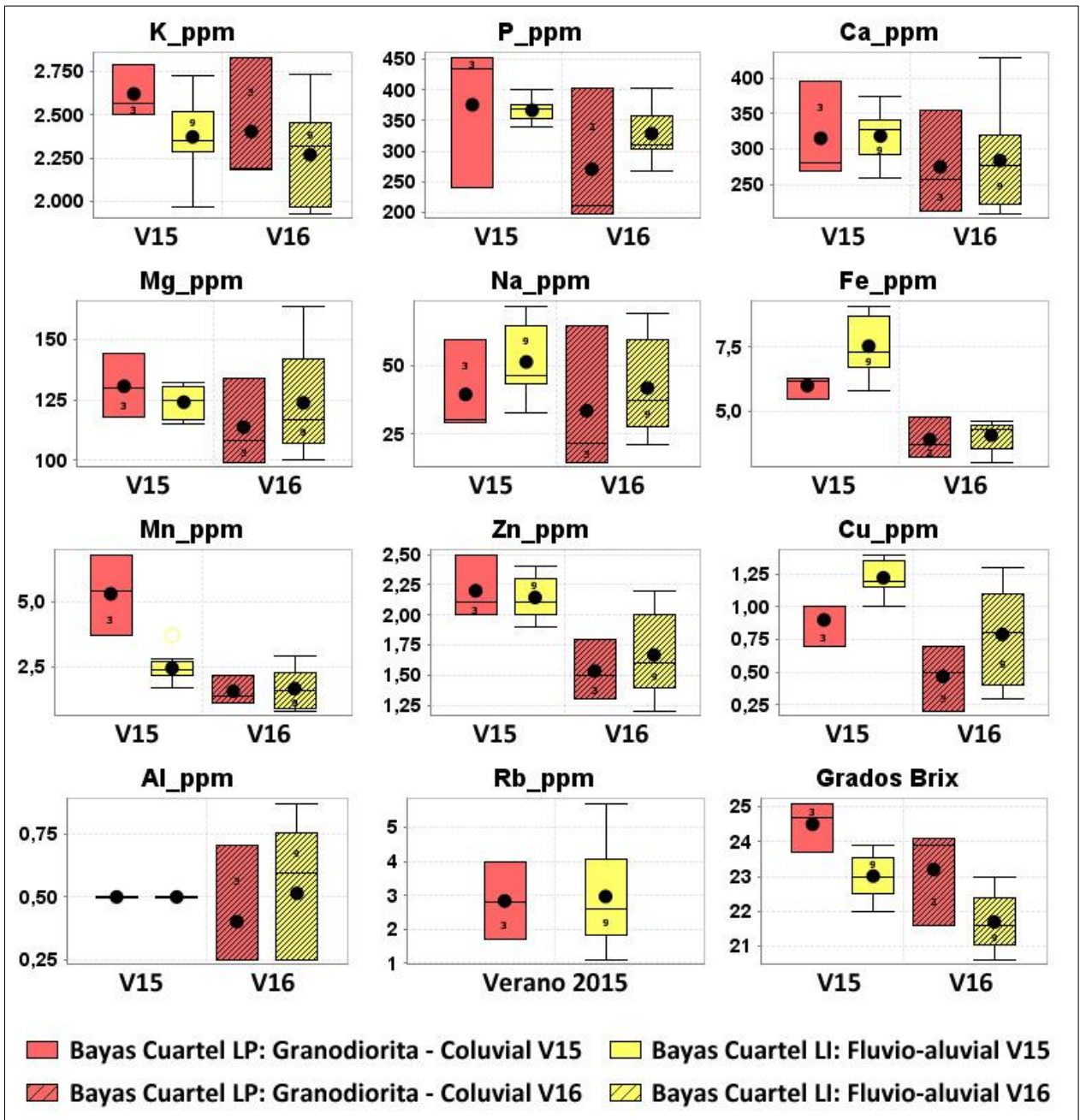


Figura 4.55. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes y grados brix de los frutos de Santa Cruz.

Durante la temporada verano 2015, los elementos Mg y Mn tienen distribuciones que se caracterizan por valores medios más altos en el cuartel Pendiente (cajas rojas), pero con valores levemente más altos en el cuartel Isla durante la temporada V16 (cajas amarilla tachadas). Esta distribución es similar a la de Zn, aunque en para este elemento, se registra una notoria diferencia entre temporadas (V15 > V16), la que no es tan clara para Mn y Mg (Fig. 4.55).

Por último, los elementos Al y Rb medidos en una sola temporada, muestran valores medios levemente superiores en el cuartel Isla (cajas amarillas, Fig. 4.55).

#### 4.6.4.2 Metales en frutos en Santa Cruz

Los metales con respuesta analítica corresponden a Cu, Zn y Cr, este último solamente en la temporada V16. Los contenidos de éstos en las bayas de Santa Cruz se presentan a través de sus estadísticas básicas (Tabla A4.36; Anexos) y de su distribución estadística en gráficos de cajas (Fig. 4.56).

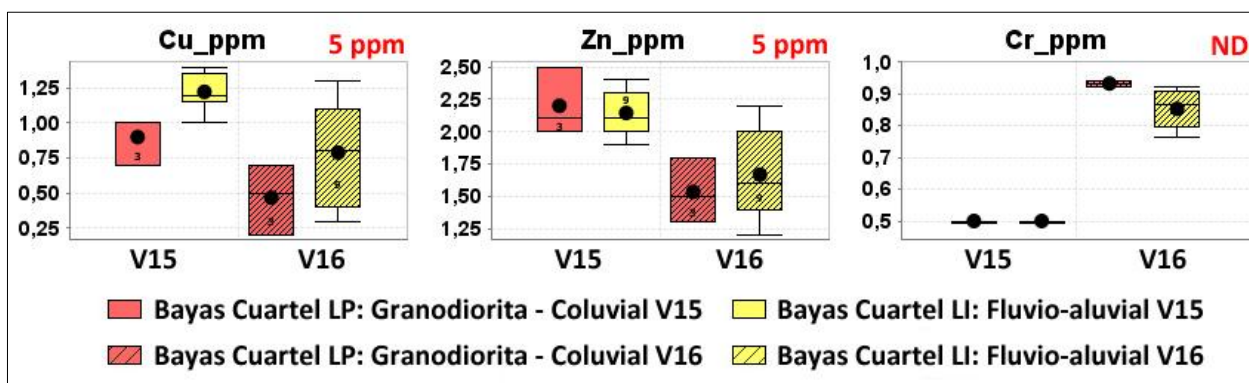


Figura 4.56. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en los frutos de Santa Cruz. Valores en rojo corresponden al Reglamento chileno sanitario de los alimentos (1997).

Respecto a la Reglamento chileno para alimentos (1997), todos los datos de metales con respuesta analítica se encuentran en valores bajo la norma. La abundancia relativa es mayor en promedio para todos los datos en Zn, luego Cu y Cr ( $Zn > Cu > Cr$ ).

Los elementos Cu y Zn ya fueron abordados en el apartado anterior, mostrando en general mayores promedios relativos en ambos cuarteles de la temporada V15 y con Cu siempre mostrando contenidos medios superiores en el cuartel Isla (cajas amarillas). Para el caso de Cr en las bayas, los contenidos son mayores en el cuartel Pendiente con concentraciones muy similares en las tres muestras (Fig. 4.56).

#### 4.6.5 HIDROQUÍMICA DE SANTA CRUZ

En la cuenca de Santa Cruz se toman diez muestras de aguas, cuya ubicación puede observarse en la figura A4.5 (Anexos). Las muestras de aguas de lluvia ( $n=1$ ) y aguas subterráneas I15 ( $n=2$ ) fueron colectadas en invierno de 2015, mientras que las muestras de aguas de riego ( $n=1$ ), de tranque ( $n=1$ ) y subterráneas V16 ( $n=5$ ) se recolectaron durante el verano 2016. Al momento del muestreo del agua de lluvia se constató que el balde que

contenía una de las muestras se había volteado y, por lo tanto, en esta viña se cuenta con una sola muestra de esta matriz.

#### 4.6.5.1 Físicoquímica de aguas en Santa Cruz

Los resultados de los parámetros físicoquímicos medidos en las matrices de aguas de la viña en Santa Cruz se exponen en la tabla A4.37 (Anexos). En cuanto a la distribución de los datos, ésta puede observarse de modo comparativo en los gráficos de la figura 4.57.

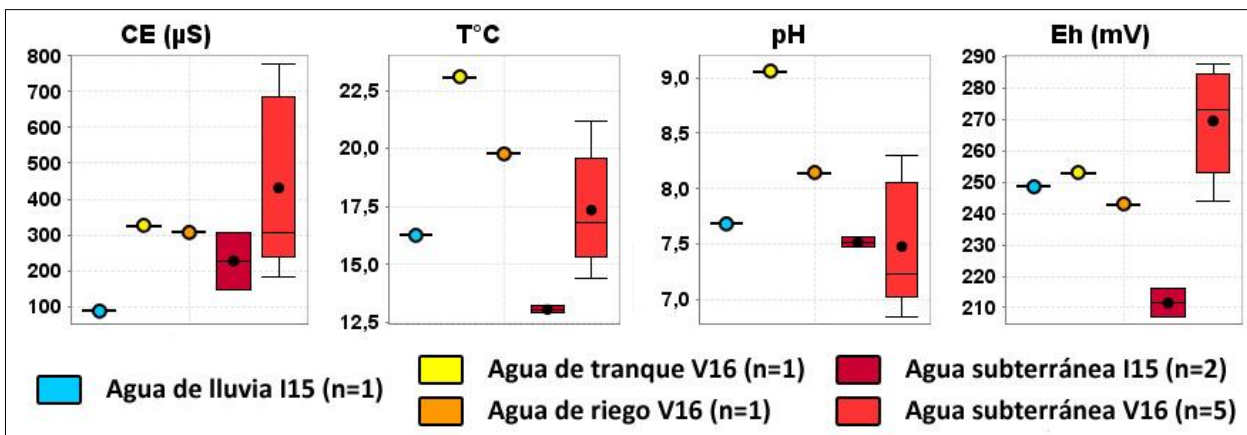


Figura 4.57. Parámetros físicoquímicos conductividad eléctrica (CE), temperatura (T), pH y potencial de óxido-reducción (Eh) medidos en terreno en las muestras de agua de Santa Cruz.

La muestra de agua de lluvia posee los menores valores de CE (91  $\mu\text{S}$ ), sin embargo, con pH (7,7) similar al promedio en aguas subterráneas y con Eh (+249 mV) cercano a los valores de aguas de riego y de tranque (Fig. 4.57).

Por otra parte, la muestra de tranque posee valores de CE (327  $\mu\text{S}$ ) y Eh (+253 mV) similares a los del agua de riego (312  $\mu\text{S}$  y +243 mV), sin embargo, la muestra de tranque tiene comparativamente la mayor temperatura (23.1°C) y el pH (9.06) más alcalino de todas las matrices de aguas consideradas (Fig. 4.57).

Para todos los parámetros físicoquímicos, las aguas subterráneas medidas en verano 2016 muestran una alta dispersión en los resultados, además de presentar valores promedios considerablemente mayores de CE, temperatura y Eh, respecto a las aguas subterráneas en invierno de 2015 (Fig. 4.57). Estas últimas, muestran los más bajos valores de Eh y temperatura en comparación al resto de muestras de aguas. Finalmente, el pH promedio es similar en las aguas subterráneas de ambas temporadas ( $\bar{x}_{I15} = 7,52$ ;  $\bar{x}_{V16} = 7,48$ ) y menores a los pHs de las aguas de riego y tranque (Fig. 4.57).



#### 4.6.5.2 Nutrientes en aguas de Santa Cruz

Los resultados de los nutrientes analizados en las muestras de aguas de la viña de Santa Cruz son expuestos en la tabla A4.37 (Anexos), además la distribución de los datos en escala logarítmica se presentan en la figura 4.58. Para las matrices de aguas en estudio, el elemento Fe posee todos los datos con valores menores al límite de detección.

Respecto a la Norma de aguas de riego (1978), todas las muestras analizadas en Santa Cruz se encuentran bajo las concentraciones preestablecidas.

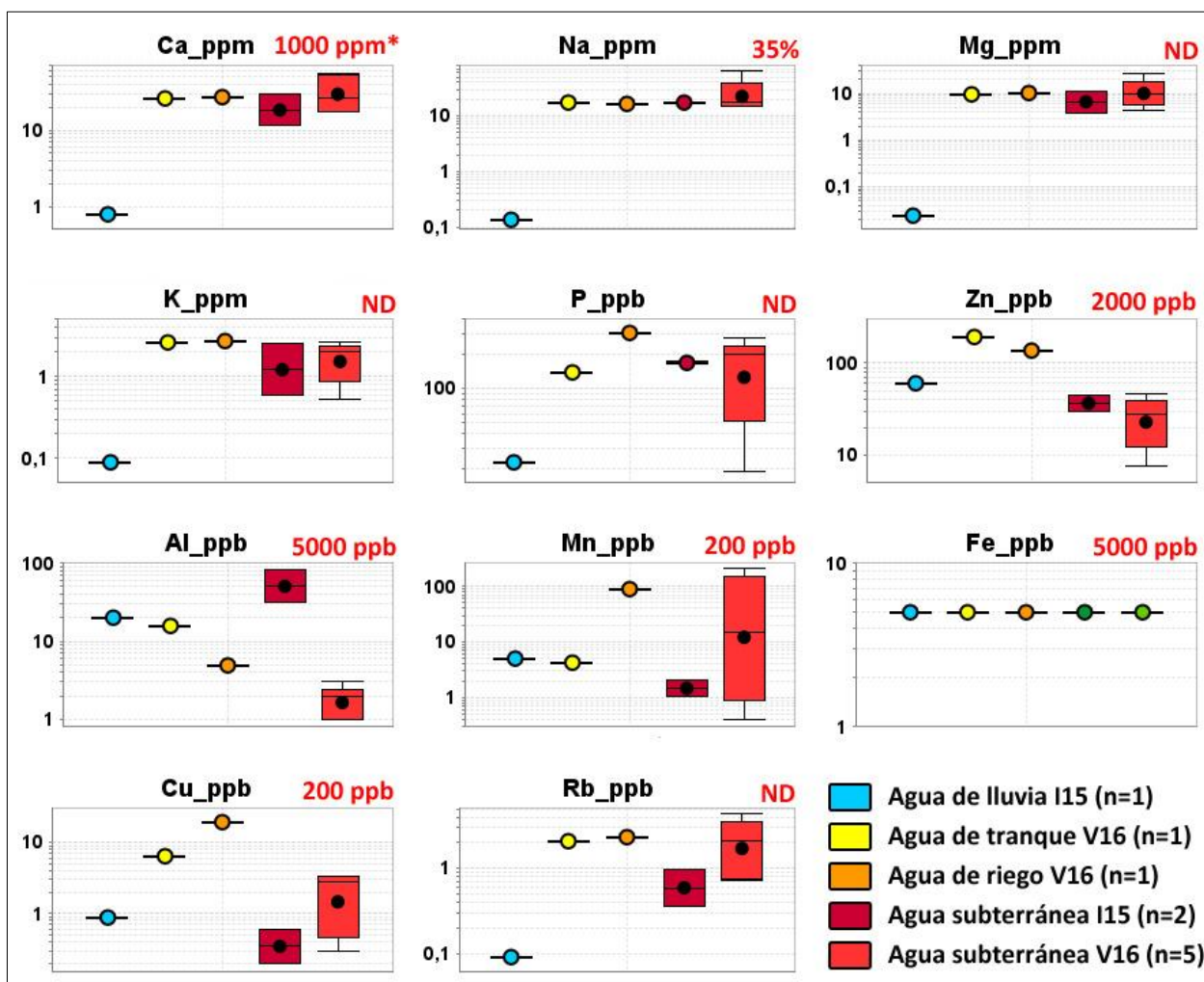


Figura 4.58. Contenidos de nutrientes en escala logarítmica en las muestras de aguas de Santa Cruz. Valores en rojo corresponden a la Norma chilena N°1333 para aguas de riego (1978).

Las concentraciones de Ca, Na, Mg, K, P y Rb son menores en las muestras de aguas lluvias, mientras que para Zn, Al, Mn y Cu los valores en aguas lluvias superan en algunos casos a las aguas subterráneas, de tranque y/o aguas de riego (Fig. 4.58).

Las aguas de riego y de tranque en conjunto presentan los mayores valores de K, Zn y Cu, respecto a las aguas lluvias y subterráneas. Particularmente, el agua de riego tiene las más altas concentraciones de P, K, Mn, Cu y Rb y el agua de tranque el mayor contenido de Zn. Para los elementos Ca, Na, Mg y Al, los valores son similares a lo obtenido para aguas subterráneas (Fig. 4.58).

Por su parte, las aguas subterráneas muestran los menores valores para Zn, respecto a todas las matrices de aguas; del mismo modo, Cu presenta contenidos bajos, más cercanos al agua de lluvia, en ambas temporadas de medición. Por otra parte, las aguas subterráneas muestran similares valores en las dos estaciones para los elementos P, K y Zn. Por el contrario, destaca la alta variabilidad en las mediciones de Al, registrando las mayores concentraciones en las muestras del invierno 2015 y los más bajos contenidos en las aguas subterráneas del V16. Además, los elementos Ca, Na, Mg, Cu, Rb y Mn presentan mayores promedios en las aguas subterráneas muestreadas en el verano 2016, sin embargo, para el caso de Mn, esta condición está dado por elevados contenidos en las muestras GW-L7 (103 ppb) y GW-L21 (212,2 ppb).

#### **4.6.5.3 Metales en aguas de Santa Cruz**

Las concentraciones de metales en las aguas de Santa Cruz se exponen en la tabla A4.38 y en la figura 4.59. Los elementos con al menos una muestra con respuesta analítica corresponden a Zn, Cu, As, Cr, Mo, Sn, Ni, Pb, Sb y Cd.

Todas las muestras de aguas de Santa Cruz poseen valores menores a la Norma chilena de agua de riego.

El agua de lluvia presenta respuesta analítica para los elementos Zn, Cu, Pb, Sb y Cr. Los contenidos de Zn son mayores a los registrados en las aguas subterráneas y el Sb es mayor respecto a las aguas de tranque y de riego. Las concentraciones de Cu y Cr son bajas, mientras que para el Pb, esta matriz es la única que presenta respuesta analítica.

En cuanto a las aguas de tranque y de riego, éstas poseen respuesta analítica para Zn, Cu, As, Cr, Sn y Mo, mostrando en conjunto las más altas concentraciones de Zn, Cu y As. Particularmente, el agua de tranque posee las mayores concentraciones de Zn y de As, mientras que el Cu es considerablemente más alto en las aguas de riego, en relación a las matrices de aguas restantes. Por otra parte, los valores de Cr, Sn y Mo, son en general, similares a los del agua subterránea.

Para la mayoría de los metales, las aguas subterráneas de ambas temporadas muestran valores menores a los registrados en las aguas de tranque y riego, con excepciones para: Sn y

Sb, que poseen una alta concentración en las aguas subterráneas medidas en I15; Cromo que presenta los contenidos más altos en verano 2016 y, por último, Ni y Cd, aunque en este caso, las altas concentraciones corresponden a puntuales muestras que presentan respuesta analítica para estos metales.

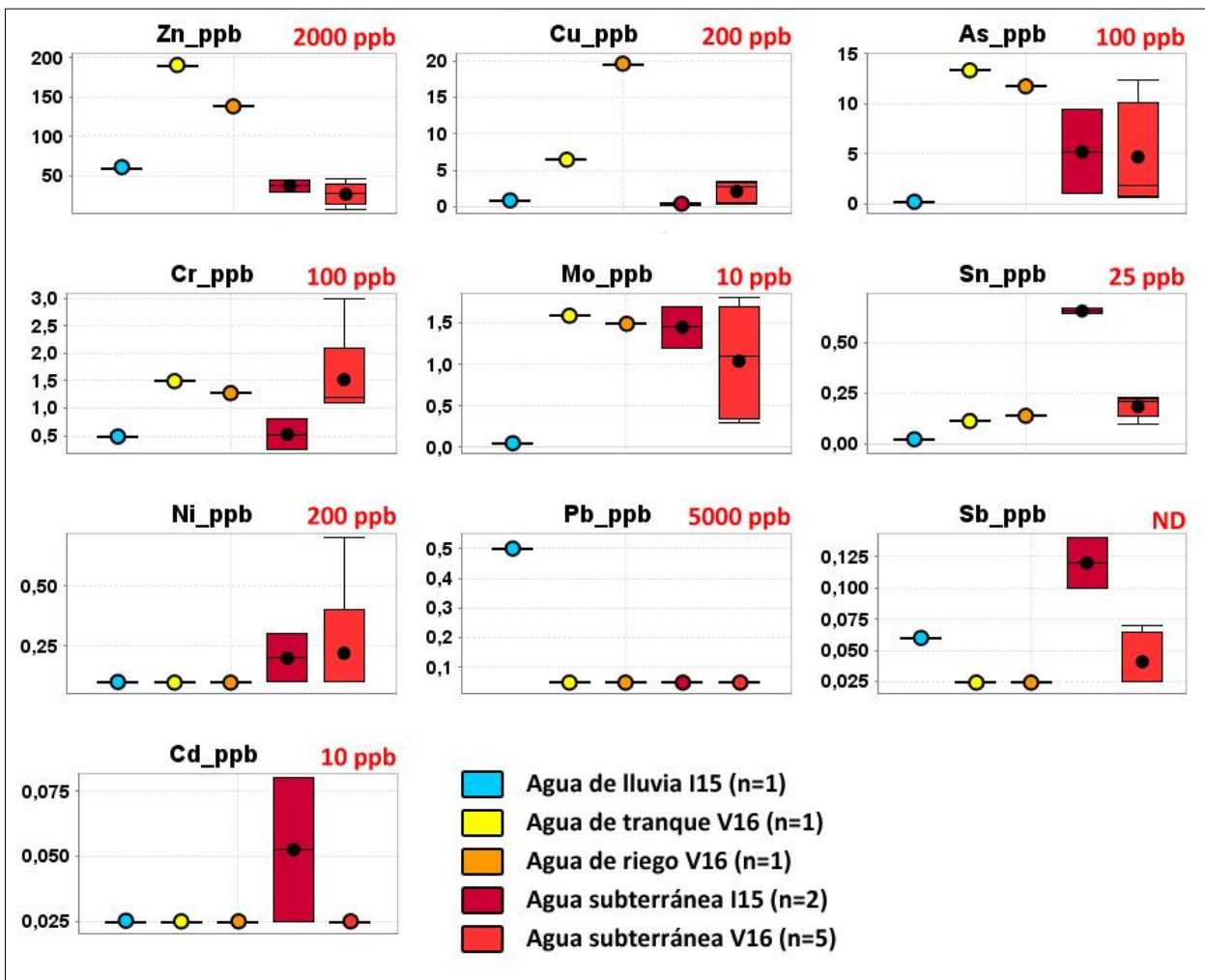


Figura 4.59. Contenidos de metales en las muestras de aguas de Santa Cruz. Valores en rojo corresponden a la Norma chilena N°1333 para aguas de riego (1978).

#### 4.6.6 PERFILES DE SUELO SELECCIONADOS EN SANTA CRUZ

Los suelos seleccionados en Santa Cruz corresponden a los perfiles de las calicatas LI-5, LI-8 y LI-13 en el cuartel Isla y los perfiles LP-11, LP-10 y LP-14 en el cuartel Pendiente (Fig. 4.60). Además dentro del cuartel Isla, se consideran también los perfiles de suelo LI-1 y LI-2 para los análisis físicos y químicos del suelo.



Figura 4.60. Ubicación de calicatas seleccionadas (puntos verdes) en la viña de Santa Cruz.

#### 4.6.6.1 Mineralogía en roca y fracción limo-arcilla en suelos de Santa Cruz

La mineralogía semicuantificada de la fracción limo-arcilla de suelos y de las rocas parentales pulverizadas de Santa Cruz se presentan en la tabla A4.39 (Anexos) y en las figuras 4.61 para rocas y 4.62 para los suelos.

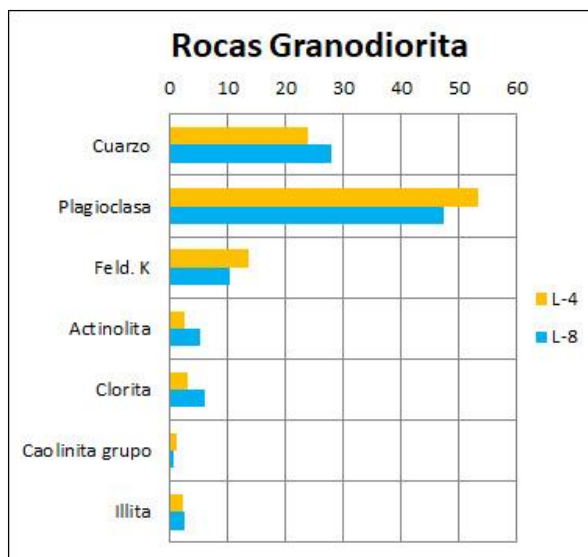


Figura 4.61. Gráfico de barra con la mineralogía de las rocas granodioríticas de Santa Cruz.

Las rocas parentales LR-4 y LR-8 (Fig. 4.61) poseen un alto porcentaje (alrededor de 50%) de plagioclasas (Pg), con contenido de cuarzo (Qz) entre 24-28% y cerca de 10% de feldespato potásico (Feld. K), además menores proporciones (6-2%) de actinolita (Act), clorita (Chl) e illita (Illi) y trazas de arcillas del grupo de la caolinita (Cao).



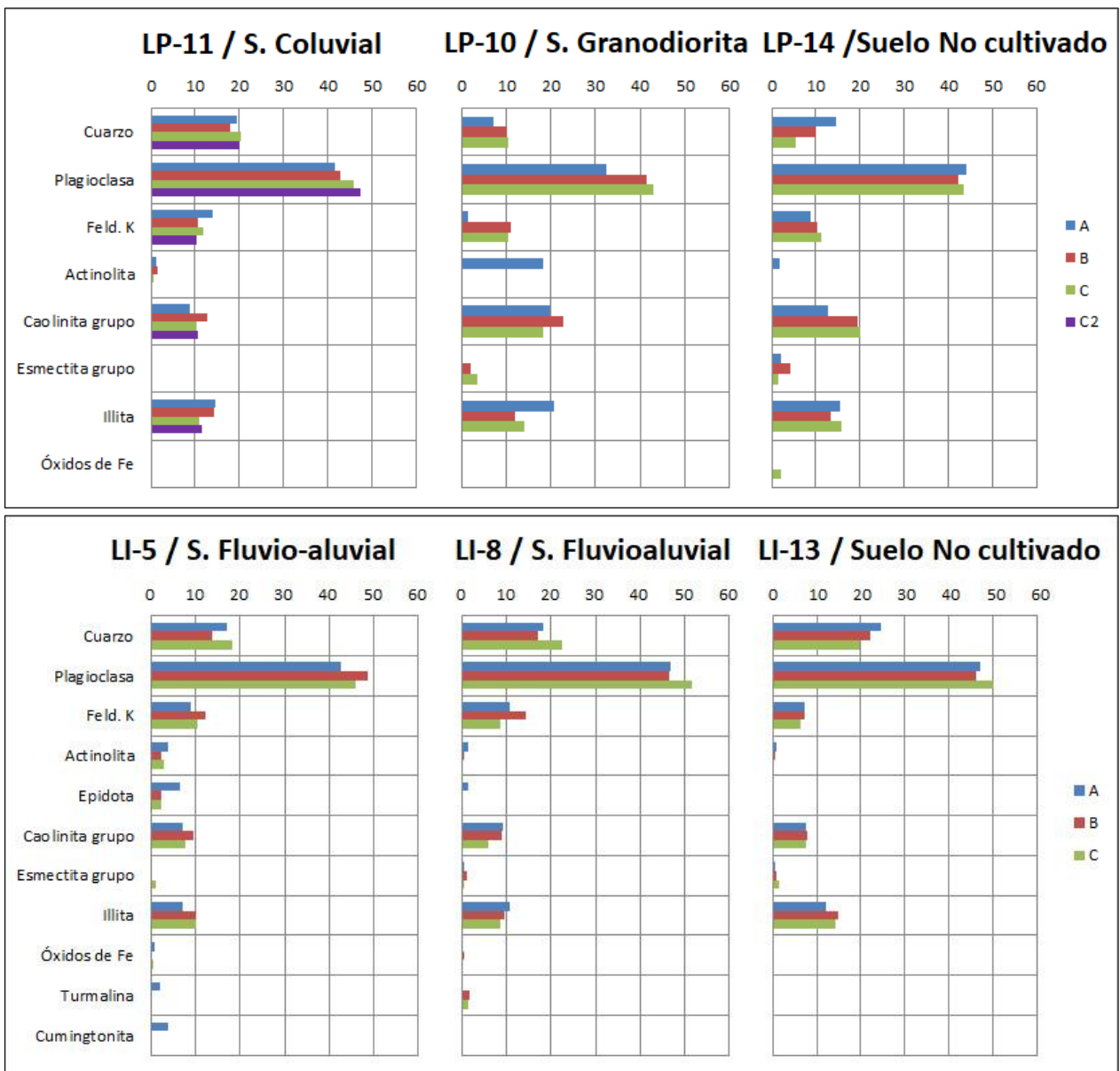


Figura 4.62. Gráficos de barra con la mineralogía presente en los horizontes A, B, C y C2 de los perfiles de suelos seleccionados en Santa Cruz: (arriba) LP-11, LP-10 y LP-14 del cuartel Isla; (abajo) LI-5, LI-8 y LI-13 del cuartel Pendiente.

Los suelos del cuartel Pendiente, tanto cultivados como no cultivado, presentan una mineralogía similar con la roca parental, sin embargo, se registra una desaparición en todos los suelos de clorita, disminución relativa de 10% de Pg y Qz y aumento de la proporción de arcillas de los grupos de Cao e Illi. Además en los perfiles LP-10 (cultivado) y LP-14 (no cultivado), desarrollados directamente sobre la roca, se reconoce la aparición de esmectita (Esm) y la pérdida de Act de los horizontes B y C. Por último, en el suelo no cultivado se mide magnetita (Mag) en el horizonte C (Fig. 4.62).

Respecto a la roca, los suelos del cuartel Isla poseen similares proporciones de Pg, Qz y Feld. K, con un aumento en los porcentajes relativos de Illi y Cao, desaparición de Chl, aparición de Esm y disminución del contenido de Act, estas dos últimas condiciones se dan principalmente en los perfiles LI-8 y LI-13 (Fig. 4.62). Adicionalmente, en los suelos cultivados (LI-5 y LI-8) de este cuartel se reporta la aparición de epidota (Ep), turmalina (Tur) y hematita (Hm). Particularmente, en el horizonte A del perfil LI-5 se reconoce la existencia de cumingtonita (Cum), que es un mineral del grupo de las hornblendas que también fue encontrado en Casablanca, en presencia de Tur.

#### 4.6.6.2 Mineralogía de arcillas en Santa Cruz

La caracterización de la mineralogía de arcillas (filosilicatos) para las rocas parentales y los suelos de Santa Cruz se presenta en la tabla A.4.40 (Anexos) y en los gráficos de barra de la figura 4.63.

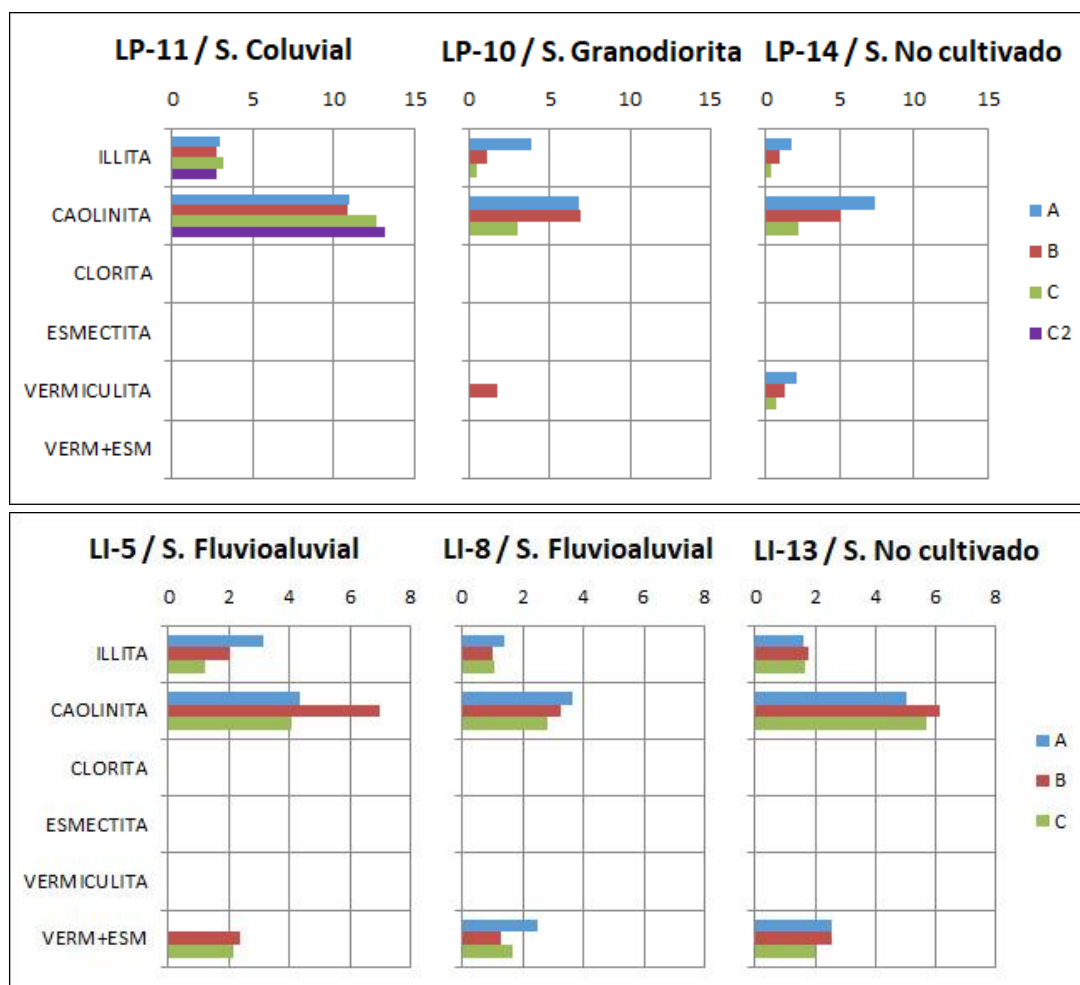


Figura 4.63 Gráficos de barra con la mineralogía de filosilicatos (arcillas) en los horizontes A, B, C y C2 de los perfiles de suelos seleccionados de Santa Cruz: (arriba) LP-11, LP-10 y LP-14 del cuartel Pendiente; (abajo) LI-5, LI-8 y LI-13 del cuartel Isla. Resultados obtenidos de Salgado (2019).

Las rocas granodioríticas de Santa Cruz LR-4 y LR-8 presentan diferentes minerales de arcillas, por una parte la roca LR-4 posee una mayor abundancia de esmectita, luego una abundancia moderada de clorita y caolinita, con menores contenidos de illita; mientras que en la muestra LR-8 no se reconoce esmectita y la arcilla más abundante corresponde a la caolinita, luego una abundancia media de clorita y menor proporción de illita (Tabla A4.40; Anexos).

En los suelos se observa de manera general, la ausencia de clorita, sin embargo, también se reportan diferencias en las arcillas identificadas en los dos cuarteles en estudio y en las rocas parentales. En el cuartel Pendiente, los suelos desarrollados *insitu* sobre la roca LP-10 (cultivado) y LP-14 (no cultivado) se registra alrededor de un 2 a 7% de caolinita, más abundante en los horizontes A y B y un contenido menor a 4% de illita y vermiculita, este último mineral sólo se reconoce en el horizonte B del suelo cultivado (LI-10). Por otra parte, el suelo desarrollado sobre el material coluvial tiene contenidos mayores de caolinita (11-13%), valores cercanos a 3% de illita y ausencia de vermiculita.

Los suelos del cuartel Isla, poseen también caolinita como la arcilla más abundante con valores entre 5-6% en el suelo no cultivado y cerca de 4% en los perfiles de suelo cultivado, aunque con un valor de 7% en el horizonte B del perfil LI-5; en esta misma calicata se determina illita en porcentajes que varía entre 3 y 1% desde el horizonte A hasta el C, mientras que en los suelos LI-8 y LI-13 el contenido de illita es menor (1-2%). En todos los suelos de este cuartel se identifica además la existencia conjunta de esmectita y vermiculita en porcentajes cercanos a 2% (Fig. 4.63).

#### **4.6.6.3 Propiedades físicas y químicas del suelo en Santa Cruz**

Los suelos seleccionados en los cuarteles Pendientes e Isla presentan contenidos de arena mayores a 60% y un porcentaje de partículas tamaño arcilla menor a 16%, para todas las muestras en estudio (Fig. A4.6 y Tabla A4.41; Anexos).

La textura de los suelos del cuartel Pendiente (LP-10 y LP-11) se clasifica, en general, como franco arenosa, con la muestra del horizonte C de la calicata LP-10 como areno francosa. Los valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente ( $D_a$ ) y contenido de materia orgánica (MO) varían considerablemente en las dos calicatas, desde: 5,8-7,9 meq/100g de CIC, 1,67-1,82 g/cc de  $D_a$  y 0,01-0,83% de MO, en el perfil LP-10, a 7,6-11,1 meq/100g de CIC, 1,38-1,63 g/c de  $D_a$  y 0,72-2,13% de MO, en el perfil LP-11 (Tabla A4.41; Anexos), pudiendo observar en la figura 4.64 las diferencias entre ambos materiales parentales (granodiorita y depósito coluvial monomítico, respectivamente).

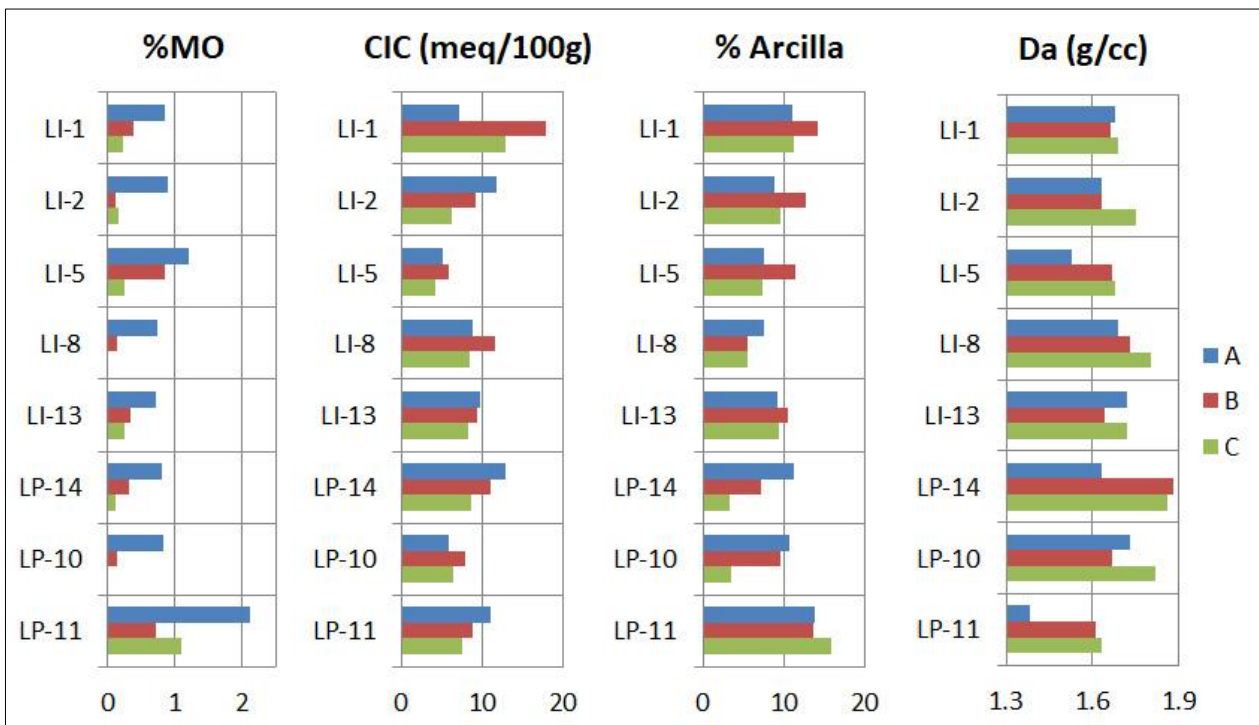


Fig. 4.64. Contenido de materia orgánica (%MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), arcillas (% Arcilla) y densidad aparente (Da) en ocho suelos seleccionados y en los horizontes A, B y C en Santa Cruz.

Por su parte, el perfil de suelo no cultivado de este cuartel (LP-14) presenta similitudes al perfil LP-10 en las características texturales (franco arenosa en horizontes A y B y areno francosa en horizonte C), contenido de materia orgánica (0,12-0,82%) y densidad aparente (1,63-1,88 g/cc), pero con un CIC en promedio mayor (10,9 meq/100g) al promedio de ambas calicatas cultivadas de este cuartel (7,9 meq/100g; Tabla 4.8 y Fig. 4.64).

Tabla 4.8. Estadísticas del contenido de materia orgánica (%MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los suelos seleccionados de los cuarteles Isla (LI) y Pendiente (LP) y los suelos no cultivados (LI-13 y LP-14), datos en general y por horizontes. Viña de Santa Cruz.

	% MO				CIC (meq/100g)			
	Blanco (LI-13)	Isla (LI)	Blanco (LP-14)	Pendiente (LP)	Blanco (LI-13)	Isla (LI)	Blanco (LP-14)	Pendiente (CP)
<b>Max</b>	0.73	1.22	0.82	2.13	9.7	17.9	12.9	11.1
<b>Min</b>	0.27	0.03	0.12	0.01	8.2	4.2	8.6	5.8
<b>Rango</b>	0.46	1.19	0.70	2.12	1.5	13.7	4.3	5.3
<b>Media</b>	<b>0.45</b>	<b>0.50</b>	<b>0.42</b>	<b>0.83</b>	<b>9.1</b>	<b>9.1</b>	<b>10.9</b>	<b>7.9</b>
<b>Desv. Est.</b>	0.24	0.40	0.36	0.76	0.8	3.9	2.2	1.9
<b>̄X Horiz A</b>	<b>0.73</b>	<b>0.93</b>	<b>0.82</b>	<b>1.48</b>	<b>9.7</b>	<b>8.2</b>	<b>12.9</b>	<b>8.5</b>
<b>̄X Horiz B</b>	<b>0.36</b>	<b>0.39</b>	<b>0.33</b>	<b>0.44</b>	<b>9.3</b>	<b>11.2</b>	<b>11.1</b>	<b>8.4</b>
<b>̄X Horiz C</b>	<b>0.27</b>	<b>0.17</b>	<b>0.12</b>	<b>0.56</b>	<b>8.2</b>	<b>8.0</b>	<b>8.6</b>	<b>7.0</b>

Los suelos seleccionados del cuartel Isla (LI-1, LI-2, LI-5 y LI-8) tienen una textura franco arenosa a areno francoso, particularmente en los horizontes B y C del perfil LI-8 (Tabla A4.41;



Anexos). La Da varía desde 1,53 a 1,80 g/cc y en general es inferior en los horizontes A y B (Fig. 4.64). En promedio la CIC es 9,1 meq/100g y en general es más alta en el horizonte B (Tabla 4.8), destacando la CIC de 17,9 meq/100g en el horizonte B del perfil LI-1 (Fig. 4.64). Además los valores medios del contenido de MO va disminuyendo desde los horizontes A (0,93%), al B (0,39%), hasta el C (0,17%).

Por último, la textura en el suelo no cultivado del cuartel Isla (LI-13) es franco arenosa, con una densidad aparente entre 1,64-1,72 cc/g (Tabla A4.41; Anexos). El promedio de CIC es igual al de suelo cultivado (9,1 meq/100 g), mientras que contenido de MO es bajo (0,45%), variando desde 0,73% en el horizonte A, 0,36% en el B y 0,27% en el horizonte C. En general, se destaca en esta viña, que los contenidos de MO de los suelos no cultivados es menor al de los suelos cultivados (Fig. 4.64), mientras que lo esperable es que éstos sean más altos (Tabla 4.8).

## 4.7 RESULTADOS VIÑA DE SAN JAVIER

### 4.7.1 GEOLOGÍA A ESCALA DE CUARTEL (1:5.000) EN SAN JAVIER

En la viña de San Javier se estudia el cuartel “Carmenere”, el cual abarca un área de 6,1 ha y se ubica en un terreno plano ubicado en una cuenca de relleno aluvial en el extremo oriental de la Cordillera de la Costa. En este cuartel se realizan doce calicatas en una malla relativamente regular, mientras que la calicata blanco se localiza aproximadamente a 1 km al este del cuartel (Fig. 4.65). Los perfiles estudiados tienen profundidades que varían entre 66 a 146 cm.

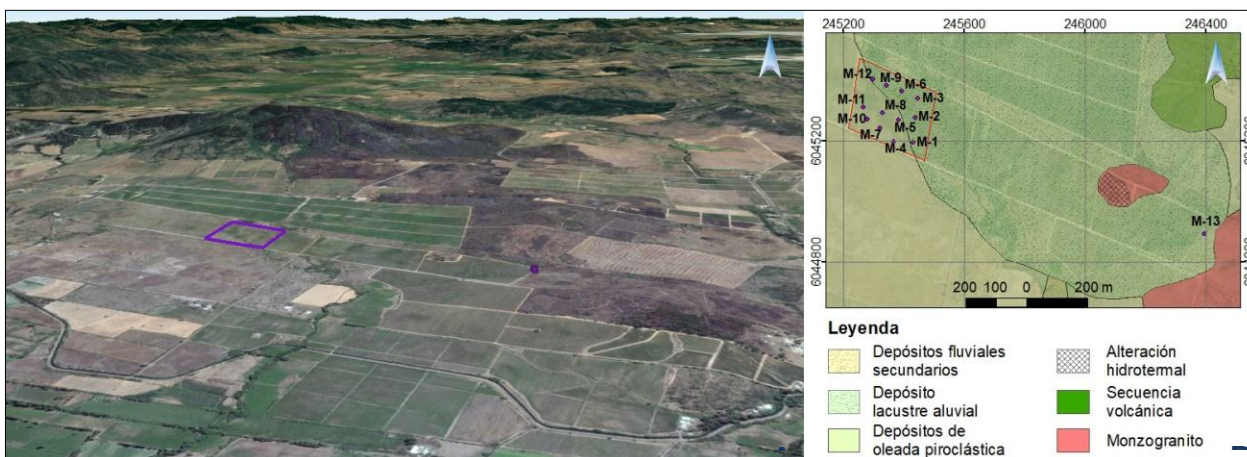


Figura 4.65. Cuartel Carmenere de la viña de San Javier (A) Contexto geomorfológico del cuartel. Imagen obtenida desde Google Earth. (B) Mapa geológico a escala cuartel.

A partir de la descripción de los perfiles de suelo, en el cuartel Carmenere se reconocen dos materiales parentales diferentes. Las calicatas Mv-4, Mv-5, Mv-7, Mv-8, Mv-10 y Mv-11 (Fig.

4.66) corresponden al suelo desarrollado directo sobre la roca, la cual corresponde a una toba vítrea proveniente de un depósito de oleada piroclástica; en algunas calicatas esta roca se presenta fracturada y craquelada, mostrando evidencias de meteorización física y biológica, influenciada por el efecto de las raíces, estos sectores poseen un alto grado de permeabilidad y circulación de aguas meteóricas en invierno (ejemplo Mv-7). Además, sobre este nivel de roca, se observa en algunas calicatas un horizonte color marrón, rico en arcillas y agrietado, el cual podría evidenciar un arado previo a la plantación de las vides (ejemplo calicatas Mv-5 y Mv-8).

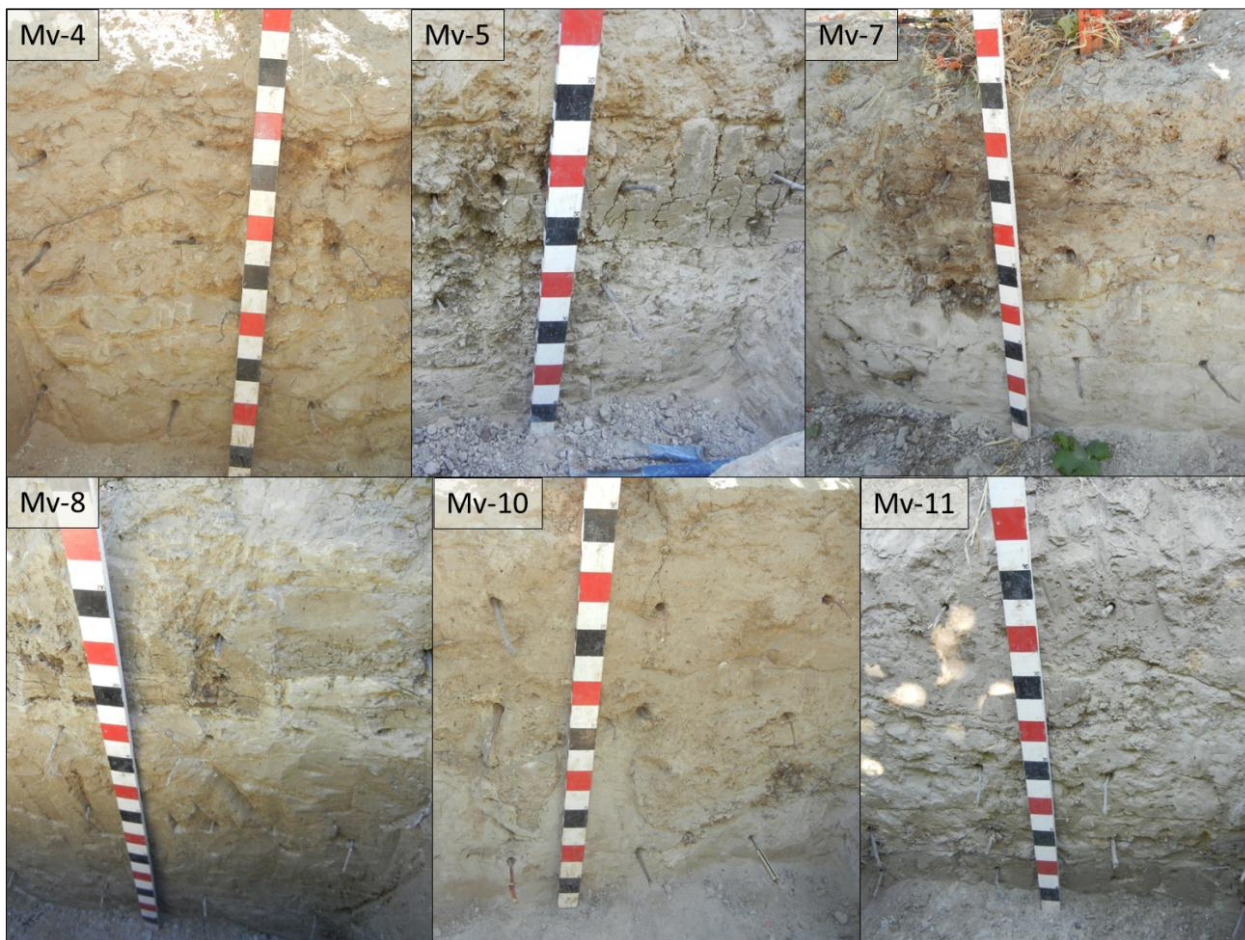


Figura 4.66. Calicatas Mv-4, Mv-5, Mv-7, Mv-8, Mv-10 y Mv-11, mostrando un suelo formado sobre una toba vítrea con evidencias de intervención antrópica (arado). Cuartel Carmenerre en viña de San Javier.

Por su parte, a partir del levantamiento de las calicatas Ms-1, Ms-2, Ms-3, Ms-6, Ms-9, Ms-12 y Ms-13 se determina que sobre el nivel tobáceo se deposita un material de grano muy fino con intercalaciones de al menos dos lentes conglomerádicas (ejemplo en calicatas Ms-2, Ms-3 y Ms-12). Tanto por la granulometría y la geometría del depósito, se interpreta que éste tiene un origen lacustre, con aportes de material más grueso indicando la presencia de paleocanales fluviales o depósitos aluviales (Fig. 4.67). En los niveles de grano fino se desarrolla un material



coloidal de color gris negruzco, con alto contenido materia orgánica y arcillas, el cual se presenta agrietado y en donde se reconoce la formación de nódulos de Mn-Fe.

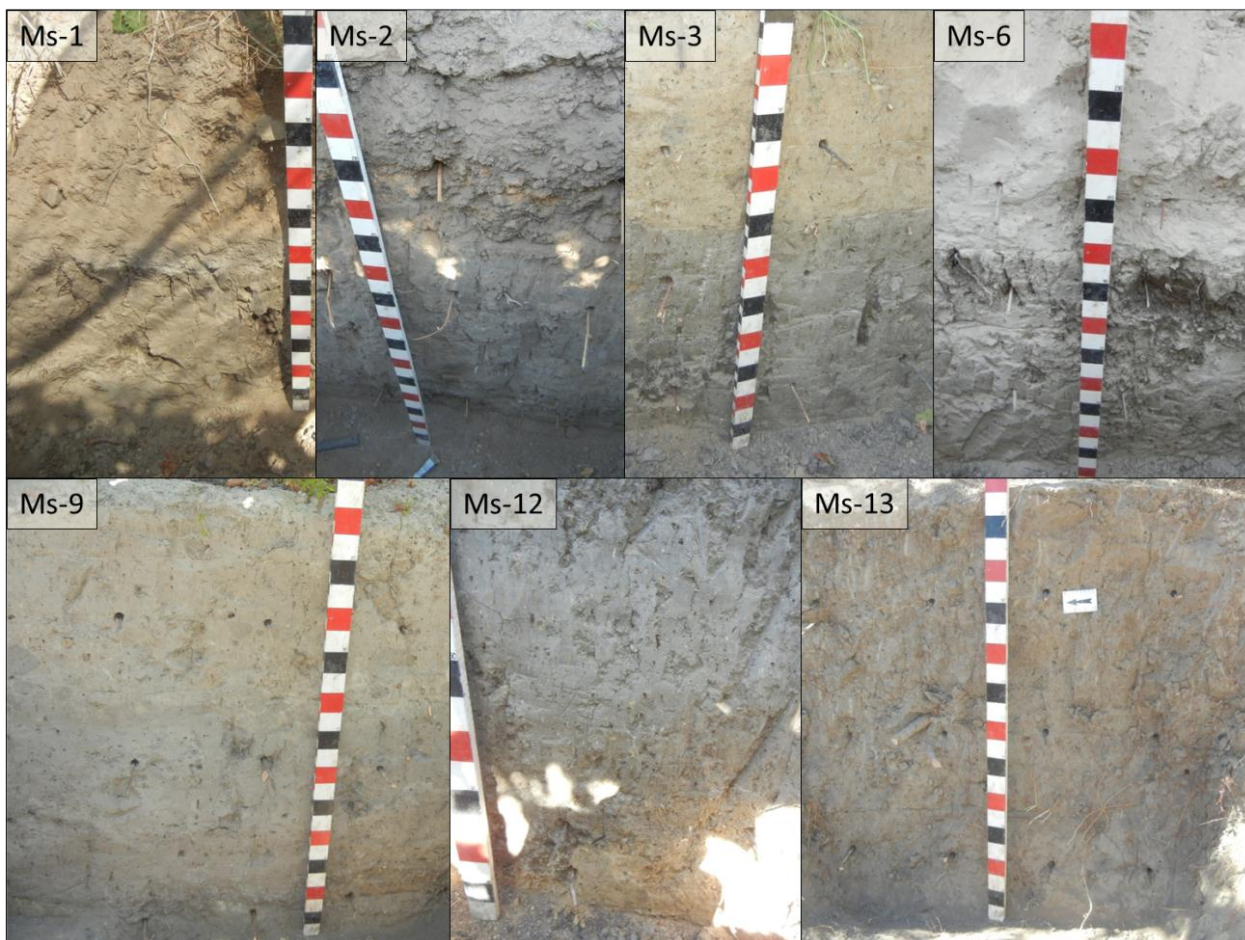


Figura 4.67. Calicatas Ms-1, Ms-2, Ms-3, Ms-6, Ms-9, Ms-12, Ms-13, mostrando un suelo desarrollado sobre un depósito lacustre-aluvial. Cuartel Carmenera en viña de San Javier.

#### 4.7.2 FISICOQUIMICA DE SUELOS EN SAN JAVIER

En la tabla 4.9 se presentan los estadígrafos básicos de las propiedades fisicoquímicas de los suelos de la viña de San Javier, para las cuatro temporadas de estudio. Además los datos por calicata y horizontes se exponen en la tabla A4.42 (Anexos).

Los parámetros pH, CE y T° pudieron ser medidos en todas la temporadas. El pH promedio medido en los suelos de la viña de San Javier, es estadísticamente mayor en las temporadas de verano ( $\bar{x}_{V15}=7,22$ ;  $\bar{x}_{V16}=7,27$ ) respecto a las temporadas de invierno (Fig. 4.68A y 4.68B), entre ambos inviernos, es en I14 en que se mide el menor promedio de pH ( $\bar{x}_{I14}=6,0$ ;  $\bar{x}_{I15}=6,25$ ) en esta viña, lo cual es coincidente con la cantidad de precipitaciones durante los días de medición (precipitaciones totales: I14=34,6 mm; I15=11,2 mm).

Tabla 4.9. Estadísticas básicas de las condiciones fisicoquímicas del suelo medidas en cuatro temporadas en la viña de San Javier.

Viña		pH	CE mS/cm	T° °C	Eh mV	Estadística	pH	CE mS/cm	T° °C	Eh mV	
San Javier	Invierno 2014	6,0	0,49	11,1	nd	<b>Promedio</b>	6,25	0,41	9,8	307	Invierno 2015
		7,1	2,16	15,1	nd	<b>Máximo</b>	7,80	1,81	11,7	339	
		5,0	0,05	9,9	nd	<b>Mínimo</b>	5,11	0,0	7,5	275	
		0,5	0,46	0,8	nd	<b>Desv. est.</b>	0,69	0,39	0,8	16	
		144	144	144	0	<b>n</b>	153	159	157	40	
	Verano 2015	7,22	0,07	22,3	nd	<b>Promedio</b>	7,27	0,09	21,2	nd	Verano 2016
		8,37	1,74	27,7	nd	<b>Máximo</b>	8,96	1,14	31,1	nd	
		6,28	0	18	nd	<b>Mínimo</b>	5,83	0,0	16,8	nd	
		0,35	0,24	2,3	nd	<b>Desv. est.</b>	0,59	0,17	2,6	nd	
		163	164	164	0	<b>n</b>	160	160	160	0	

Las condiciones de conductividad eléctrica en la viña de San Javier son en promedio mayores en las temporadas de invierno ( $\bar{x}_{I14}=0,49$  mS/cm;  $\bar{x}_{I15}=0,41$  mS/cm) que en las temporadas de verano ( $\bar{x}_{V15}=0,07$  mS/cm;  $\bar{x}_{V16}=0,09$  mS/cm), aunque en la temporada V15, el promedio de CE es estadísticamente inferior al CE medio registrado en verano 2016 (Figs. 4.68C y 4.68D).

Las T° registradas en los suelos de San Javier, presenta valores medios esperablemente superiores en las temporadas de verano ( $\bar{x}_{V15}=22,3^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{x}_{V16}=21,2^{\circ}\text{C}$ ), en relación a las mediciones de invierno ( $\bar{x}_{I14}=11,1^{\circ}\text{C}$ ;  $\bar{x}_{I15}=9,8^{\circ}\text{C}$ ); siendo estadísticamente similares los promedios medidos en las estaciones estivales (Figs. 4.68E y 4.68F); esto se correlaciona con las condiciones climáticas registradas en los meses de medición, con medias en temperatura y humedad relativa comparables en las temporadas de verano, durante los dos años de medición. Mientras que en I15 se miden las T° estadísticamente menores.

Finalmente, el potencial de óxido-reducción solo pudo ser medido durante la temporada de Invierno 2015, en donde se registra un Eh promedio de +307 mV (Figs. 4.68G y 4.68H).

#### 4.7.3 GEOQUÍMICA DE LOS SUELOS DE SAN JAVIER

Los resultados geoquímicos de los suelos obtenidos en la viña de San Javier se presentan según los dos materiales parentales reconocidos en el cuartel Carmenere, de este modo se analiza el suelo cultivado desarrollado sobre la toba vítrea ( $n_{V15}=6$ ;  $n_{V16}=7$ ) y suelo cultivado ( $n_{V15}=6$ ;  $n_{V16}=5$ ) y no cultivado ( $n=3$ ) formados sobre el depósito lacustre



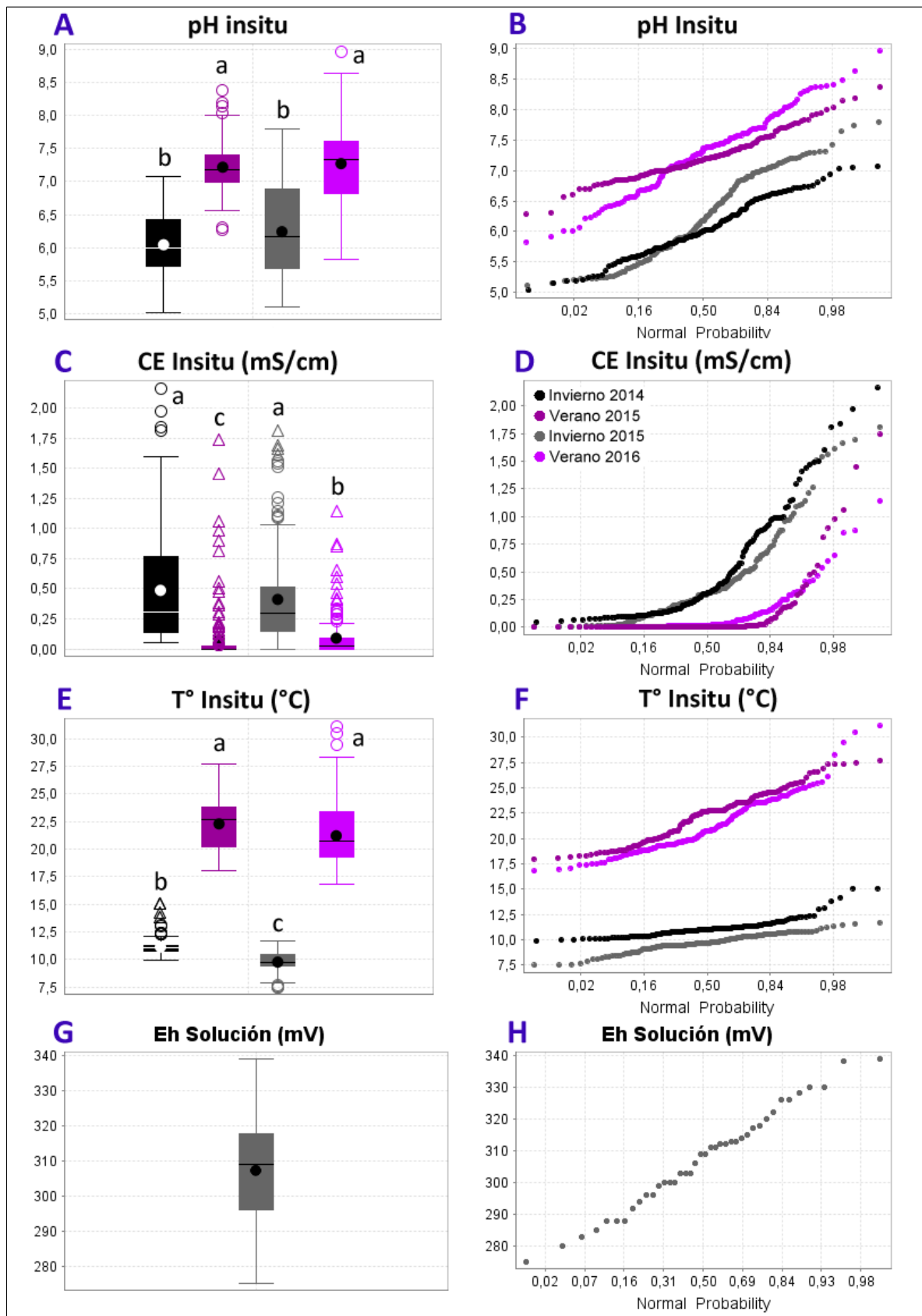


Figura 4.68. Gráficos de caja y de probabilidad con los parámetros fisicoquímicos medidos en las cuatro temporadas en San Javier. (A-B): pH. (C-D): CE. (E-F): T°. (G-H): Eh. Letras sobre cada barra indican diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza  $p < 0.05$ .

#### 4.7.3.1 Nutrientes en suelo total en San Javier

Las estadísticas básicas de las concentraciones de nutrientes, en los tres tipos de suelos de San Javier, se muestran en la tabla A4.43 (Anexos), así como también se presenta la distribución estadística en gráficos de caja (Fig. 4.69).

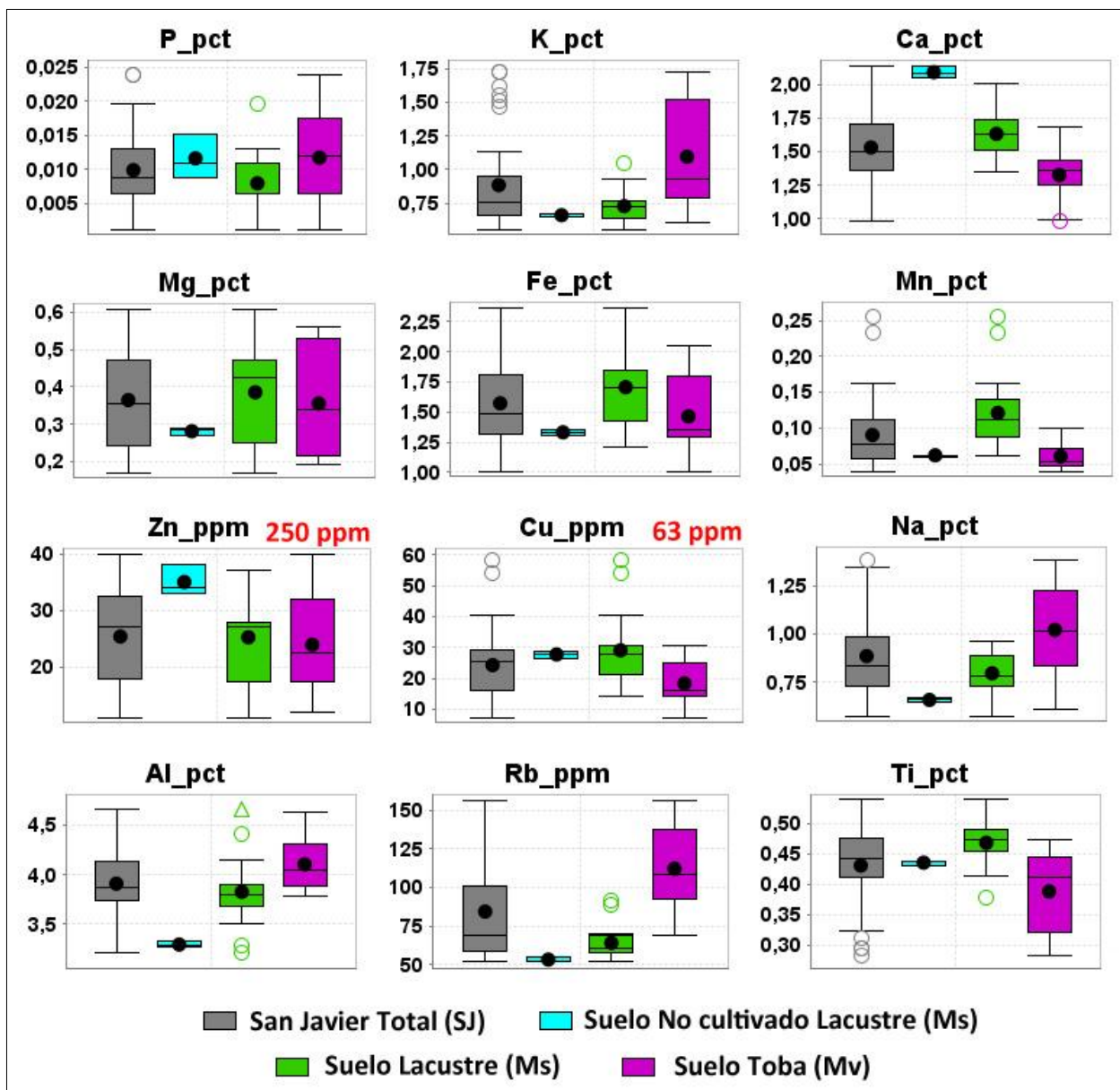


Figura 4.69. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes en suelo total de los materiales parentales muestreados en San Javier. Valores en rojo límite en suelos CCME (2016).

Al compararlos con los suelos cultivados, el suelo blanco (cajas calipso) posee las mayores concentraciones promedio de Ca y Zn, así como los valores medios más bajos de K, Mg, Fe, Na, Al y Rb (Fig. 4.69).

Las principales diferencias entre los suelos cultivados corresponden a mayores concentraciones medias de K, Na, Al y Rb y promedios más bajos de Ca, Mn, Cu y Ti en los suelos de toba (cajas moradas), respecto a los suelos lacustres (cajas verdes). Por último, los suelos cultivados y no cultivados de origen lacustre poseen valores medios similares en los nutrientes P, K, Cu, Na, Rb y Ti (Fig. 4.69).

#### 4.7.3.2 Nutrientes en la fase biodisponible del suelo en San Javier

En la tabla A4.44 (Anexos) se encuentran los estadígrafos básicos de los contenidos de nutrientes en la fase biodisponible de los suelos, además en la figura 4.70 se grafica la distribución estadística en diagramas de caja.

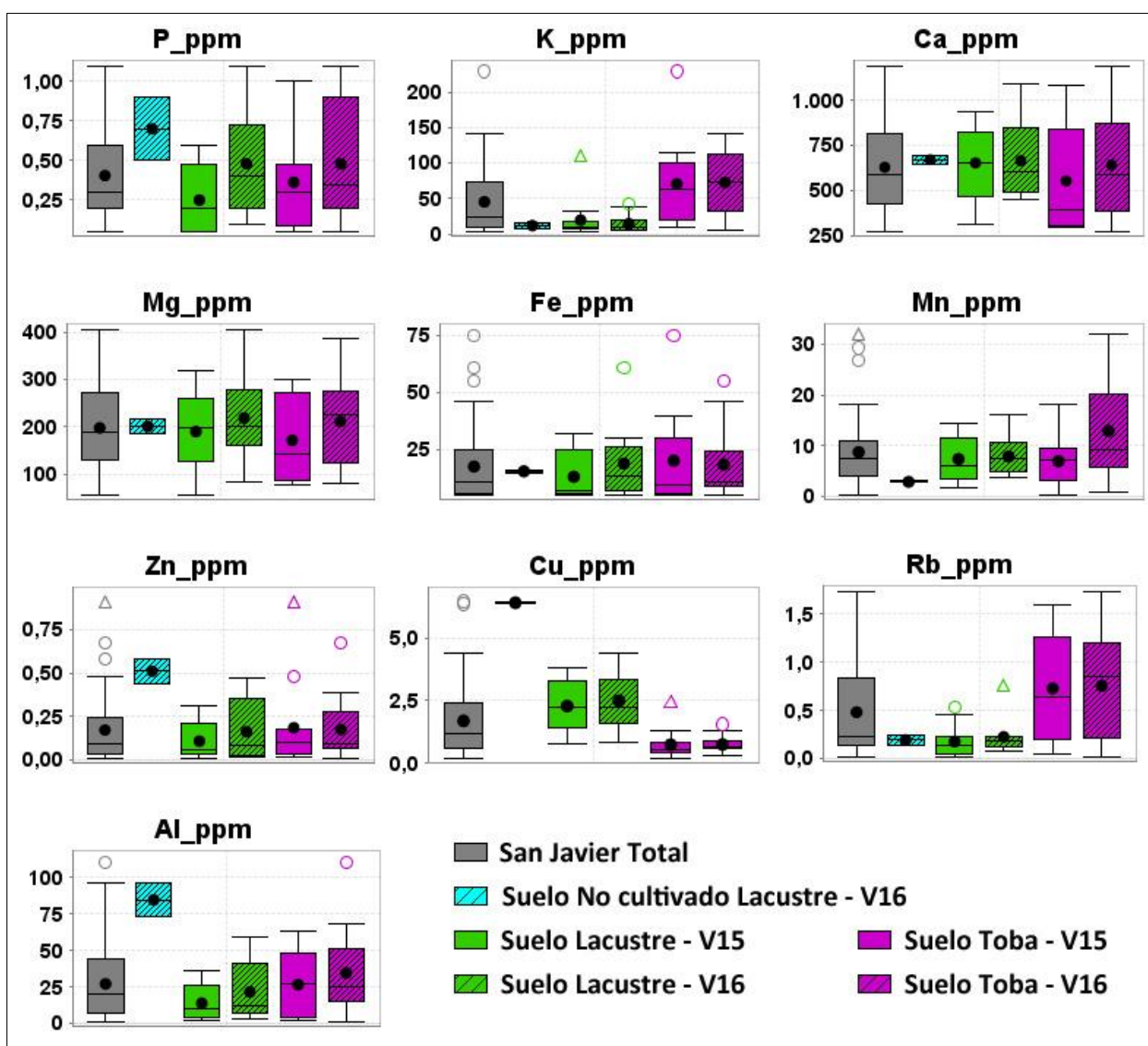


Figura 4.70. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes en la fase biodisponible del suelo en los diferentes materiales parentales muestreados en San Javier.

El suelo blanco (cajas calipso tachadas) presenta mayores concentraciones biodisponibles medias en P, Zn, Cu y Al y promedios más bajos de K y Mn, respecto a los suelos cultivados (cajas verdes). Sin embargo, al comparar ambos suelos de origen lacustre, éstos poseen similares valores medios en K, Ca, Mg, Fe y Rb en la fase biodisponible (Fig. 4.70).

Diferencias en la biodisponibilidad de nutrientes en los suelos de distinto material parental, se reconocen por una mayor concentración media de K, Rb y Al en los suelos tobáceos cultivados (cajas moradas), así como menores promedios en Cu, en relación a los suelos lacustres (cajas verdes). Mientras que Ca, Mg y Fe es similar para todos los suelos en estudio (Fig. 4.70).

Mayores concentraciones medias de P, y en menor grado de, Mg, Zn y Al se miden en la fase biodisponible de la temporada V16, en relación a las mediciones del verano 2015 (Fig. 4.70).

#### **4.7.3.3 Metales en suelo total en San Javier**

Los metales que presentan suficiente respuesta analítica en la química de suelo total de San Javier corresponden a Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, As, Sn, Mo, Sb, Cd. Las estadísticas básicas de estos metales se presenta en la Tabla A4.45 (Anexos) y su distribución estadística se puede observar en los gráficos de caja (Fig. 4.71).

Los contenidos de metales en los distintos suelos de San Javier, indican que solamente dos valores anómalos de As en el suelo cultivado lacustre, supera los 12 ppm de la Norma Canadiense para este metal. Estos datos son las muestras Ms-12B (27,10 ppm) y Ms-3C (13,30 ppm) que corresponden a niveles conglomerádicos, probablemente de origen fluvial o aluvial.

El suelo blanco de origen lacustre posee los más altos valores medios de Zn, Cr, Pb, Cd y el menor promedio de Sn, respecto a ambos suelos cultivados del cuartel Carmenere (Fig.4.71).

Diferencias entre los suelos cultivados de distinto material parental original, se presentan para los metales Cr, Ni, Pb, As, Mo y Cd, los que se poseen mayores valores medios en los suelos cultivados lacustres (cajas verdes), solo Sn es mayor en el suelo proveniente de la toba vítrea (cajas violetas; Fig. 4.71).

#### **4.7.3.4 Metales en la fase biodisponible del suelo en San Javier**

Los metales biodisponibles con respuesta analítica en los suelos de San Javier, corresponden a Ni, Pb, As, Mo, Cd, Ag y Au. Las estadísticas básicas de estos metales se muestran en la tabla A4.46 (Anexos) y la distribución estadística se grafica en diagramas de caja (Fig. 4.72). Al igual que en la química total, la fase biodisponible del suelo no cultivado (cajas calipso tachadas) presenta mayores concentraciones medias en Pb y Cd, pero además posee mayores promedios



en Ni y Ag y los menores promedios de As, respecto a la fase disponible de ambos suelos cultivados (Fig. 4.72).

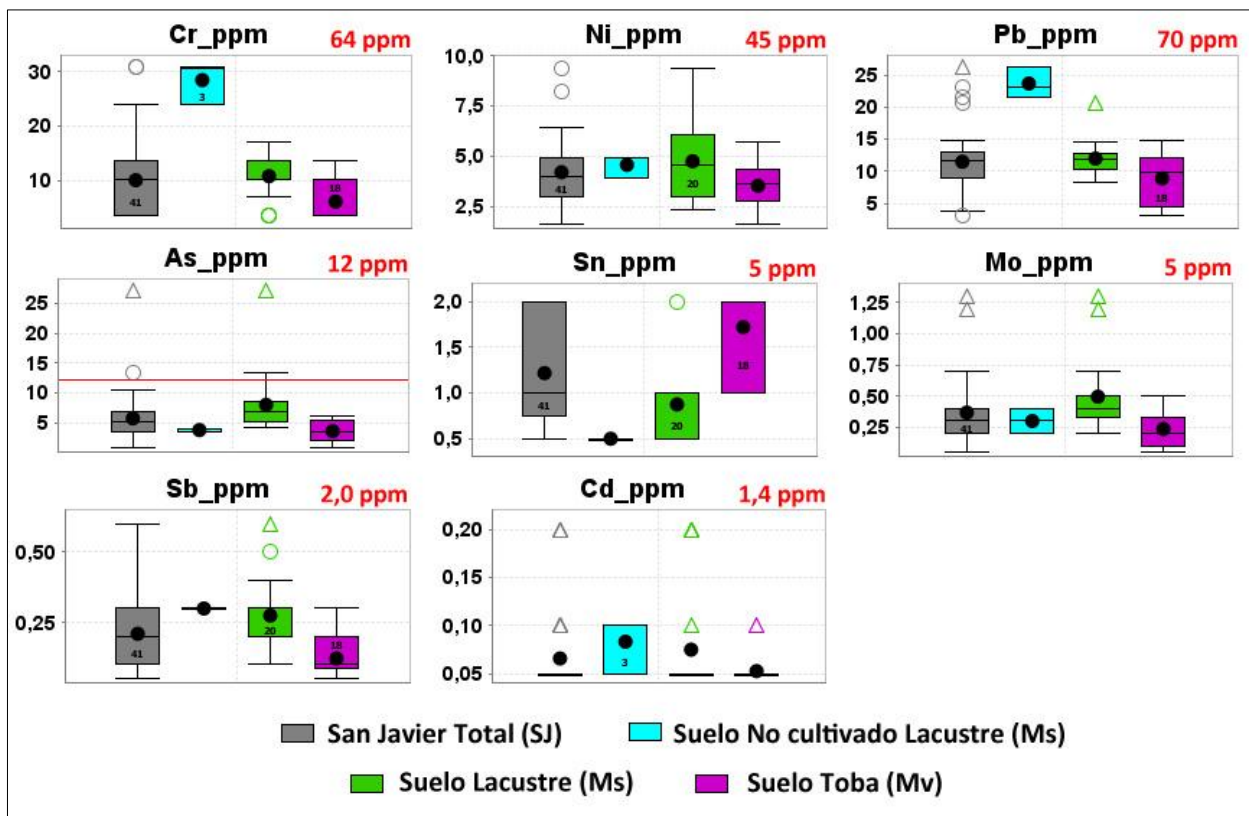


Figura 4.71 Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en suelo total de los materiales parentales muestreados en San Javier. Valores en rojo límites en suelos CCME (2016).

Las principales diferencias entre los suelos cultivados se reconocen para Ni, As, Mo, Ag y Au, los cuales son mayores, en promedio, en la fase biodisponible de los suelos lacustres (cajas verdes) y siempre menores en los suelos tobáceos (cajas moradas). Por otra parte, concentraciones similares se observan para Cd y Pb en ambos suelos cultivados, metales que se presentan notoriamente en menor proporción respecto al suelo blanco lacustre (Fig. 4.72).

Por último, concentraciones medias contrastante entre temporadas, se observan para Ni, el cual es mayor en las mediciones de la temporada V16, y para As, metal que es mayor en la fase biodisponible del suelo durante el verano 2015 (Fig. 4.72).

#### 4.7.4 QUÍMICA DE FRUTOS EN SAN JAVIER

La química de nutrientes y metales en la bayas de Carmenere del área de San Javier se expone separadamente para las frutas muestreadas en los dos materiales parentales en estudio: suelo lacustre ( $n_{V15}=6$ ;  $n_{V16}=5$ ) y suelo desarrollado sobre la toba ( $n_{V15}=6$ ;  $n_{V16}=7$ ).

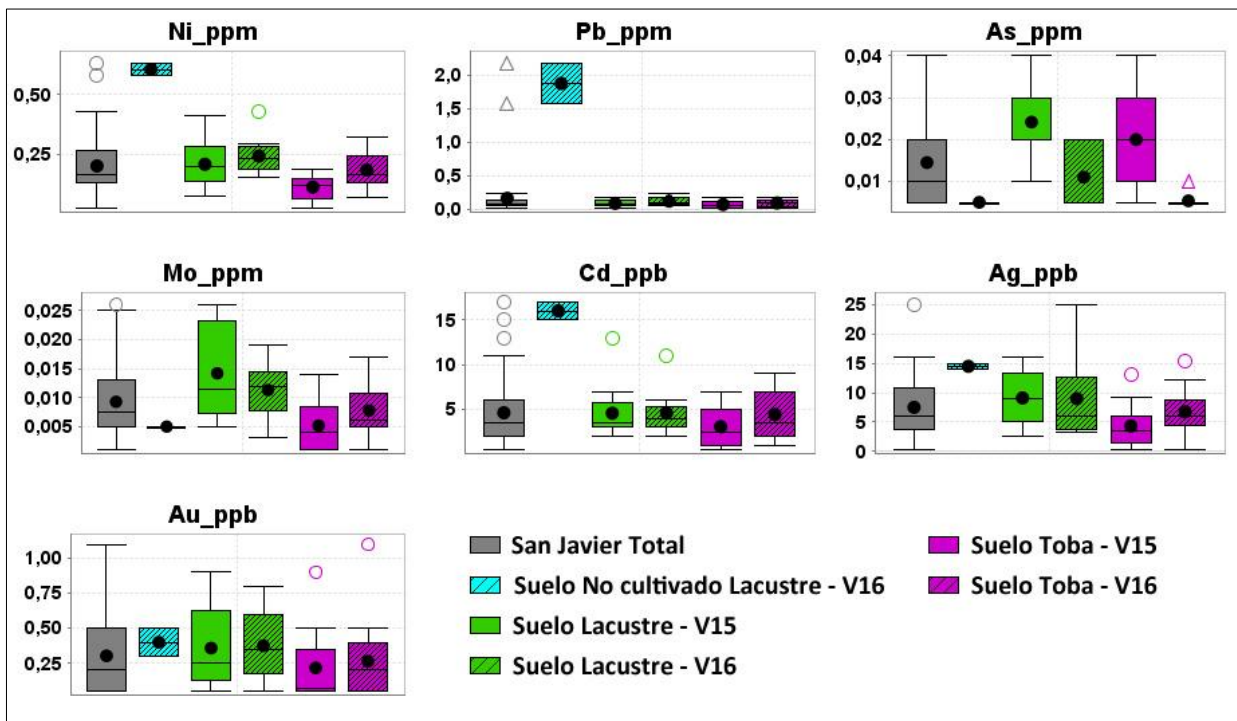


Figura 4.72. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en la fase biodisponible del suelo en los diferentes materiales parentales muestreados en San Javier.

#### 4.7.4.1 Nutrientes en frutos de San Javier

Las estadísticas básicas de la química de las bayas en San Javier se presentan en la tabla A4.47 (Anexos), además la distribución estadística de los nutrientes se observa en los gráficos de caja de la figura 4.73.

Los grados brix son en promedio más altos en las bayas que crecen sobre el material parental Toba, con una mayor dispersión de los datos (mayor rango) y un mayor promedio durante las mediciones de la temporada V15 (caja morada; Fig. 4.73). Es importante hacer notar que ambos materiales parentales se ubican en el mismo cuartel, con condiciones mesoclimáticas iguales.

La abundancia relativa de elementos en las bayas de Carmenere de la viña de San Javier es similar a la que se observa en Santa Cruz, con el siguiente orden:  $K \gg P > Ca > Mg \gg Na \gg Rb > Fe > Mn > Zn > Cu \gg Al$ .

Los nutrientes K y Mn presentan los mayores promedios en las bayas que crecen sobre suelo tobáceo, en ambas temporadas, además otros elementos tales como P, Ca, Mg y Zn muestran esta misma condición pero con promedio solo levemente superiores en algunas temporadas. Además, cabe destacar que las más altas concentraciones de Ca y, en menor medida, de K, P, Mg y Zn se registran durante el verano 2016 (Fig. 4.73).

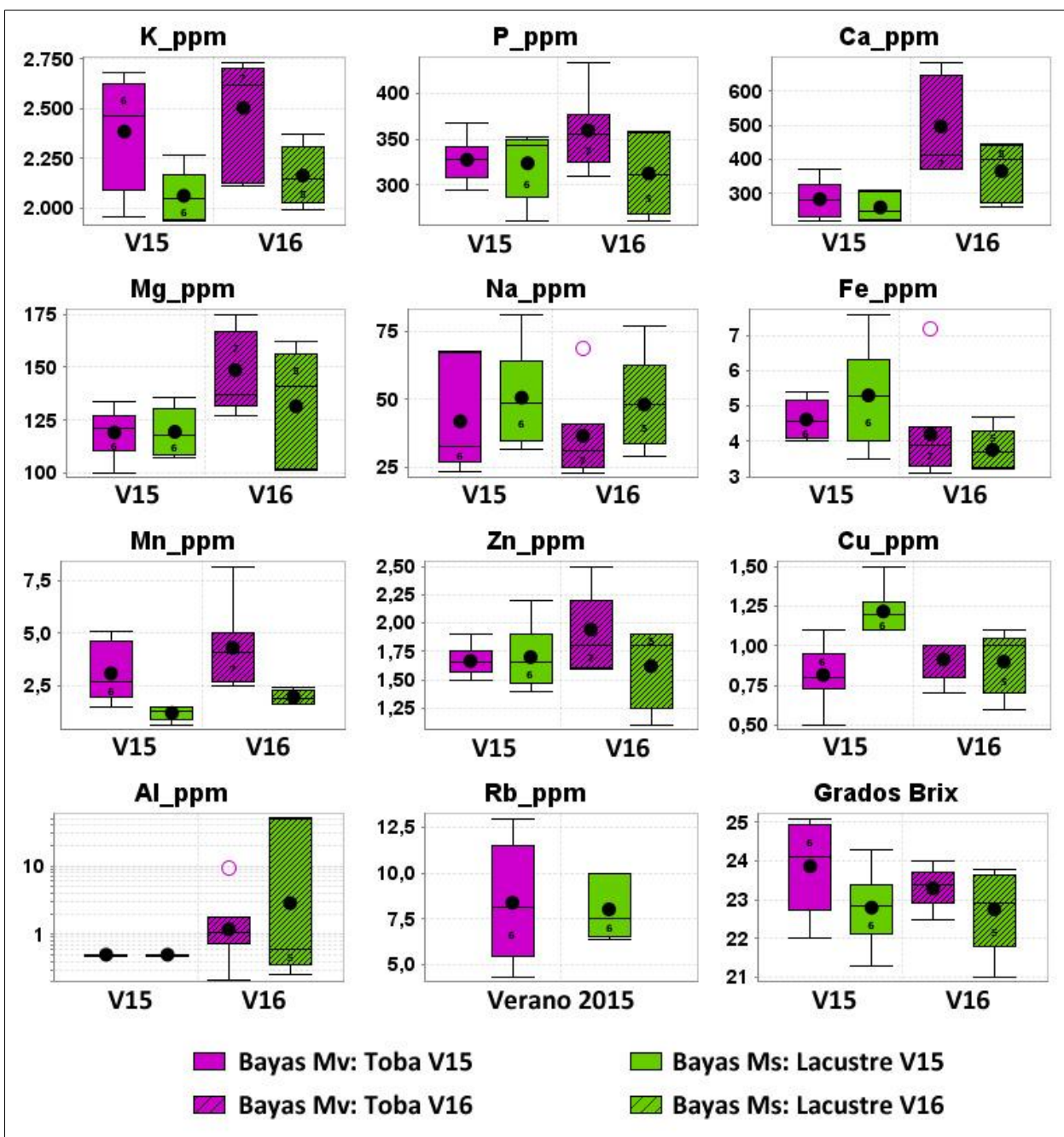


Figura 4.73. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de nutrientes y grados brix de los frutos de San Javier.

Al contrario, el elemento Na posee mayores promedios en las plantas del material parental lacustre (cajas verdes). Además, se observa una alta dispersión en los contenidos de Na obtenidos en el verano 2015 en los suelos tobáceos (caja morada), situación que también se repite para K y Rb.

Los elementos Cu y Fe muestran distribuciones bastante similares, con elevados valores medios en las bayas que crecieron sobre suelos lacustres durante la temporada V15 (cajas verdes; Fig. 4.73).

#### 4.7.4.2 Metales en frutos en San Javier

Los contenidos de metales en las bayas de San Javier, se presentan por medio de las estadísticas básicas (Tabla A4.48; Anexos) y la distribución estadística se grafica en diagramas de caja (Fig. 4.74).

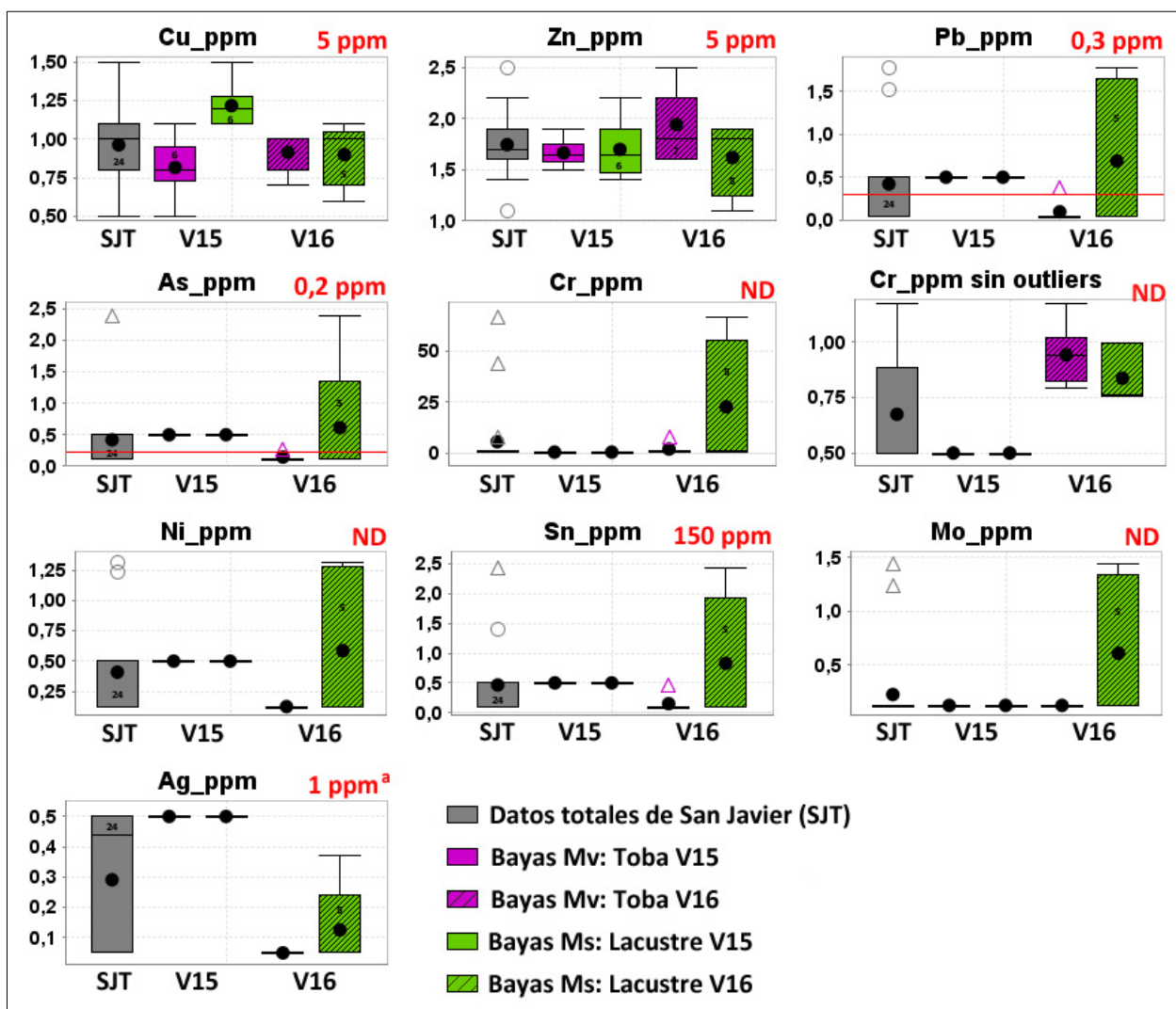


Figura 4.74. Gráficos de caja con la distribución estadística de los contenidos de metales en los frutos de San Javier. Valores en rojo corresponden al Reglamento chileno sanitario de los alimentos (1997). Valor de Ag (1 ppm<sup>a</sup>) corresponde al Código alimentario argentino (2017) por no existir norma para Ag en Chile.

Los elementos con respuesta analítica durante el verano 2015, sólo corresponden a Cu y Zn, en donde Zn es mayor Cu en cuanto a su abundancia relativa. Durante la temporada V16, además de estos elementos, Cr presenta un 100% de datos con respuesta analítica. Además se



registran tres muestras (Ms-2, Ms-3 y Mv-4) con valores sobre el límite de detección analítica para los elementos Pb, As, Ni y Sn y dos muestras (Ms-2 y Ms-3) con respuesta analítica para Mo y Ag.

Particularmente estas tres muestras, antes mencionadas, son reconocidas como valores anómalos para el caso de Cr, con valores que superan 66 y 44 veces la mediana en el caso del sector Ms (suelo lacustre) y 8 veces la mediana en el sector Mv (suelo tobáceo). Estas muestras también se perciben como los valores anómalos en el resto de los metales. Dado que éstas no se ubican en un mismo material parental, ni tienen necesariamente una distribución espacial cercana, pero a la vez son muestras consecutivas en número, se interpretan que estos resultados son producto de una contaminación en el laboratorio.

De este modo, la abundancia relativa de metales en la temporada V16 es  $Zn > Cu > Cr$  y ninguno de éstos supera los límites determinados por la Legislación chilena, a excepción de Cr, que no tiene valores establecidos por la norma.

En relación a la distribución de estos metales en los diferentes materiales parentales y temporadas medidas, puede observarse en la figura 4.74 que Cu presenta los mayores valores promedios en las bayas que crecieron en los suelos lacustres durante la temporada V15 (caja verde). Por otra parte, Zn posee los más altos contenidos medios en las bayas de los suelos tobáceos colectados durante la temporada V16 (caja violeta tachada). Por último, excluyendo los valores anómalos, Cr posee las mayores concentraciones medias en los suelos tobáceos (cajas violeta tachada).

#### **4.7.5 HIDROQUÍMICA EN SAN JAVIER**

Las muestras de aguas en la cuenca estudiada en la viña de San Javier, corresponden a trece muestras, cuya ubicación se presenta en la figura A4.7 (Anexos). Las muestras obtenidas en la campaña de invierno 2015 corresponden a aguas de lluvias ( $n=2$ ) y aguas subterráneas ( $n=4$ ) y las muestras colectadas en verano 2016, fueron agua de tranque ( $n=1$ ), agua de riego ( $n=1$ ) y aguas subterráneas ( $n=5$ ).

A diferencia de las otras viñas, que usan agua subterránea acumulada en un tranque para el riego, en San Javier el regadío se surte con agua de río canalizada, que se acopia en una pequeña piscina.

#### 4.7.5.1 Fisicoquímica de aguas en Santa Javier

Los resultados de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos en las muestras de agua de Santa Cruz se presentan en la tabla A4.49 (Anexos). Además la distribución de estos valores pueden observarse en la figura 4.75.

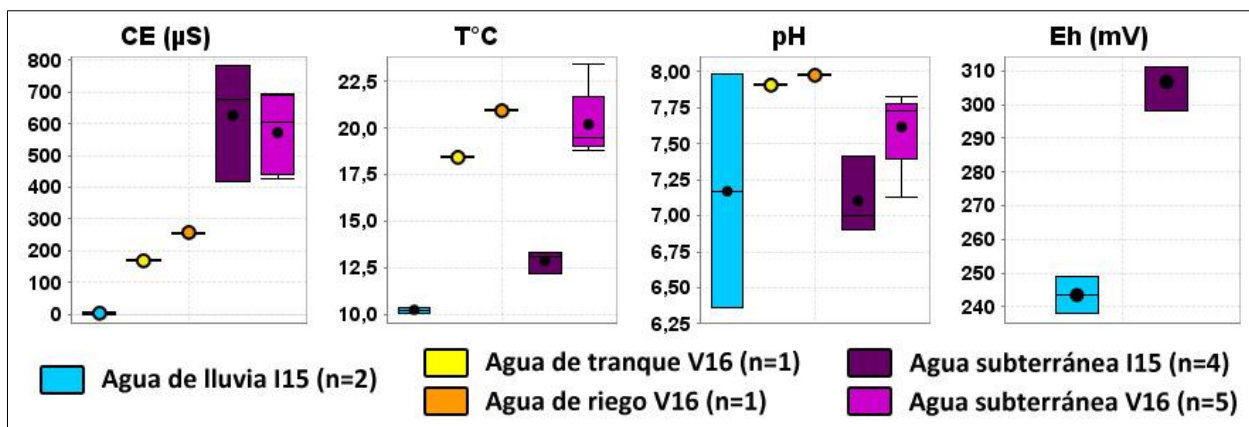


Figura 4.75. Parámetros fisicoquímicos conductividad eléctrica (CE), temperatura (T), pH y potencial de óxido-reducción (Eh) medidos en terreno en las muestras de agua de San Javier.

El agua de lluvia muestreada en San Javier tienen una muy baja conductividad eléctrica ( $\bar{x}_{CE} = 4 \mu\text{S}$ ) y los menores valores de  $T^{\circ}$  y Eh. Sin embargo, ambas muestras de lluvias tienen valores muy dispares de pH (6,36 y 7,98).

Las aguas de riego y de acopio muestran valores de CE mayores al agua de lluvia, pero considerablemente menores al de las aguas subterráneas. Las temperaturas son similares para todas las muestras de aguas medidas en la temporada verano 2016, sin embargo, el pH de estas muestras son más alcalinas que las muestras de aguas subterráneas (Fig. 4.75). Entre las aguas de riego y de acopio, estas últimas (círculos amarillos) presentan levemente menores valores de CE, T y pH (Fig. 4.75).

Las aguas subterráneas poseen valores de CE dispersos en ambas temporadas, hecho que se da por notorias diferencias entre las muestras GW-M1, GW-M9 y GW-M14, con CE entre 600 y 790  $\mu\text{S}$ , y las muestras GW-M10 y GW-M4 con CE más bajas entre 400 y 450  $\mu\text{S}$  (Fig. A4.7 y Tabla A4.49; Anexos). La temperatura de estas aguas es contrastante en ambas temporadas y en promedio el pH es mayor en las mediciones de verano 2016 (Fig. 4.75).

Finalmente cabe mencionar, que las condiciones de Eh en las muestras de aguas de la temporada verano 2016 no pudieron ser medidas por falla del equipo.

#### 4.7.5.2 Nutrientes en aguas de San Javier

Los resultados de las concentraciones de nutrientes en las matrices de aguas analizadas en San Javier son presentados en la tabla A4.49 (Anexos) y la distribución en escala logarítmica de los datos es graficada en la figura 4.76.

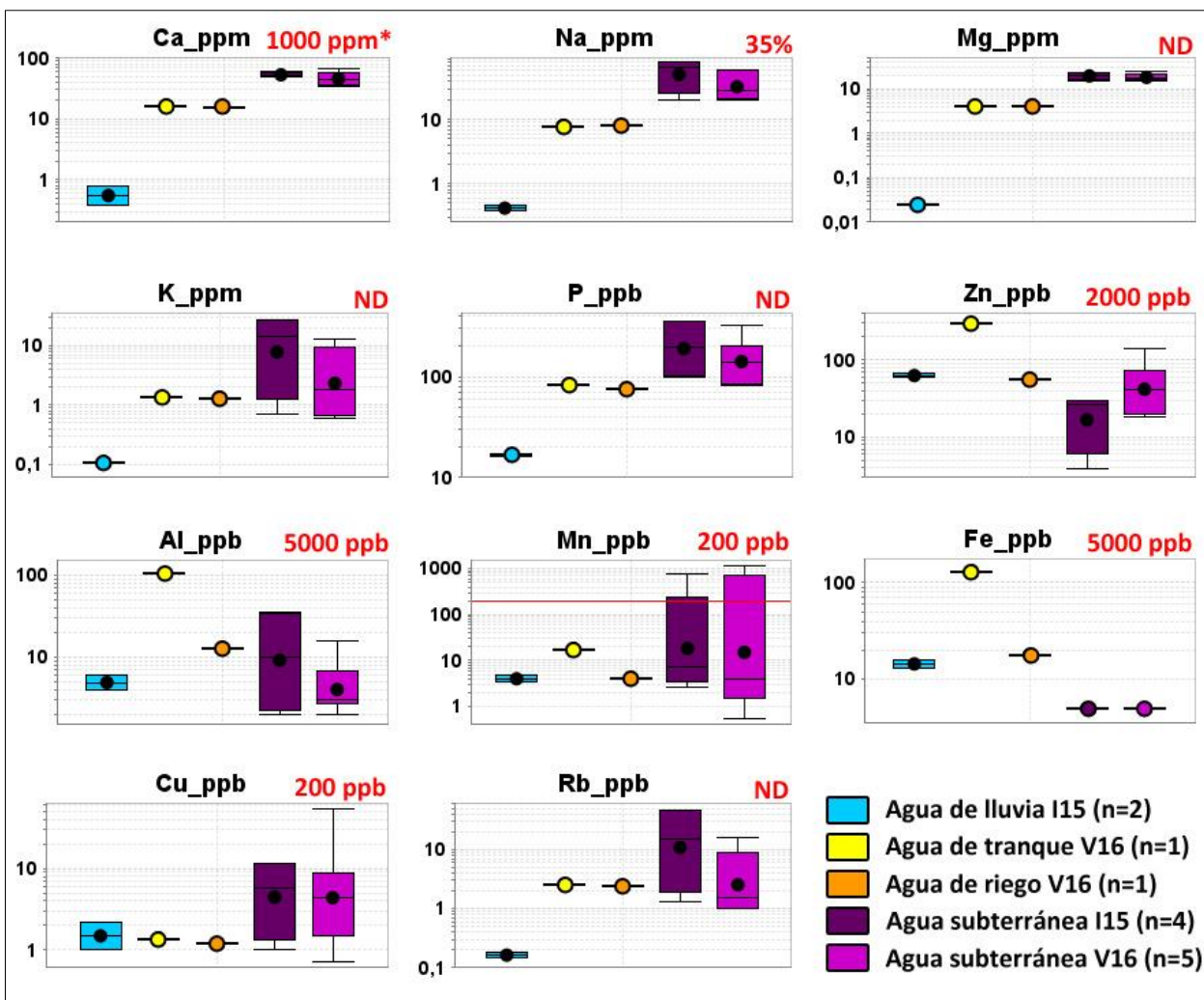


Figura 4.76. Contenidos de nutrientes en escala logarítmica en las muestras de aguas de San Javier. Valores en rojo corresponden a la Norma chilena N°1333 para aguas de riego (1978).

De los nutrientes, sólo Mn presenta valores mayores a los límites establecidos por la Norma chilena para aguas de riego. Estos valores corresponden a altas concentraciones en las muestras GW-M1, tanto en la temporada I15 (770,6 ppb) como en V16 (586,3 ppb), y en la muestra GW-M9 del verano 2016 (1191 ppb).

En San Javier las aguas de lluvia poseen las más bajas concentraciones de Ca, Na, Mg, K, P y Rb, sin embargo, estas aguas presentan mayores valores de Zn y Fe que las aguas subterráneas. Para el caso de Al y Mn el agua de lluvia tiene contenidos cercanos a los del

agua subterránea y para Cu, estas aguas muestran mayores valores que las aguas de riego y tranque, aunque menores concentraciones que el agua subterránea (Fig. 4.76).

Las aguas de tranque y de riego muestran valores similares entre sí de Ca, Na, Mg, K, P, Cu y Rb, además en general, estos nutrientes tienen contenidos más bajos que los registrados en aguas subterráneas. No obstante, para Zn, Al y Fe los valores del agua de riego y, principalmente, del agua de tranque son superiores al resto de matrices de aguas analizadas. Para Mn los contenidos son levemente mayores a los del agua de lluvia (Fig. 4.76).

Por su parte las aguas subterráneas, poseen en general los más altos valores medios de Ca, Na, Mg, K, P, Cu, Rb y Mn, aunque el promedio de este último, está fuertemente influenciado por los elevados valores medidos en algunas muestras, como ya fue descrito. Al contrario, las aguas subterráneas muestran los menores contenidos de Zn y Fe. Entre temporadas se observa que las aguas subterráneas medidas en el invierno de 2015, poseen mayores a levemente mayores contenidos de Ca, Na, Mg, K, P, Al y Rb, mientras que solamente Zn tiene contenidos más altos en la estación V16 (Fig. 4.76).

#### **4.7.5.3 Metales en aguas de San Javier**

Los datos de metales obtenidos en las muestras de aguas de la viña de San Javier, durante las dos temporadas se presentan en la tabla A4.50 (Anexos) y en la figura 4.77. Los elementos que presentan respuesta analítica al menos para una muestra corresponden a Zn, Cu, As, Cr, Mo, Sn, Ni Pb, Sb y Cd.

Todos los metales analizados en las aguas de la viña de San Javier poseen contenidos menores a los establecidos en la Norma chilena para aguas de riego.

Las aguas de lluvia no presentan respuesta analítica para los metales As, Sn y Mo. Sin embargo, respecto al resto de aguas analizadas, las aguas lluvias muestran los más altos valores de Ni, Pb y Cd, además de contenidos mayores de Cr respecto a las aguas de riego y de tranque y mayores concentraciones de Zn que en las aguas subterráneas (Fig. 4.77).

Un valor extremo de 298 ppb de Zn se mide en el agua de tranque, además para este elemento, el agua de riego presenta una concentración mayor a las aguas subterráneas. Para el resto de metales se reconoce, en general, que las aguas de riego y de tranque poseen concentraciones menores a las del agua subterránea, con excepción de Cr, Sn y Sb, que muestran contenidos entre las aguas subterráneas. Valores levemente mayores en el agua de riego respecto al agua de tranque se miden para Sn y Mo.



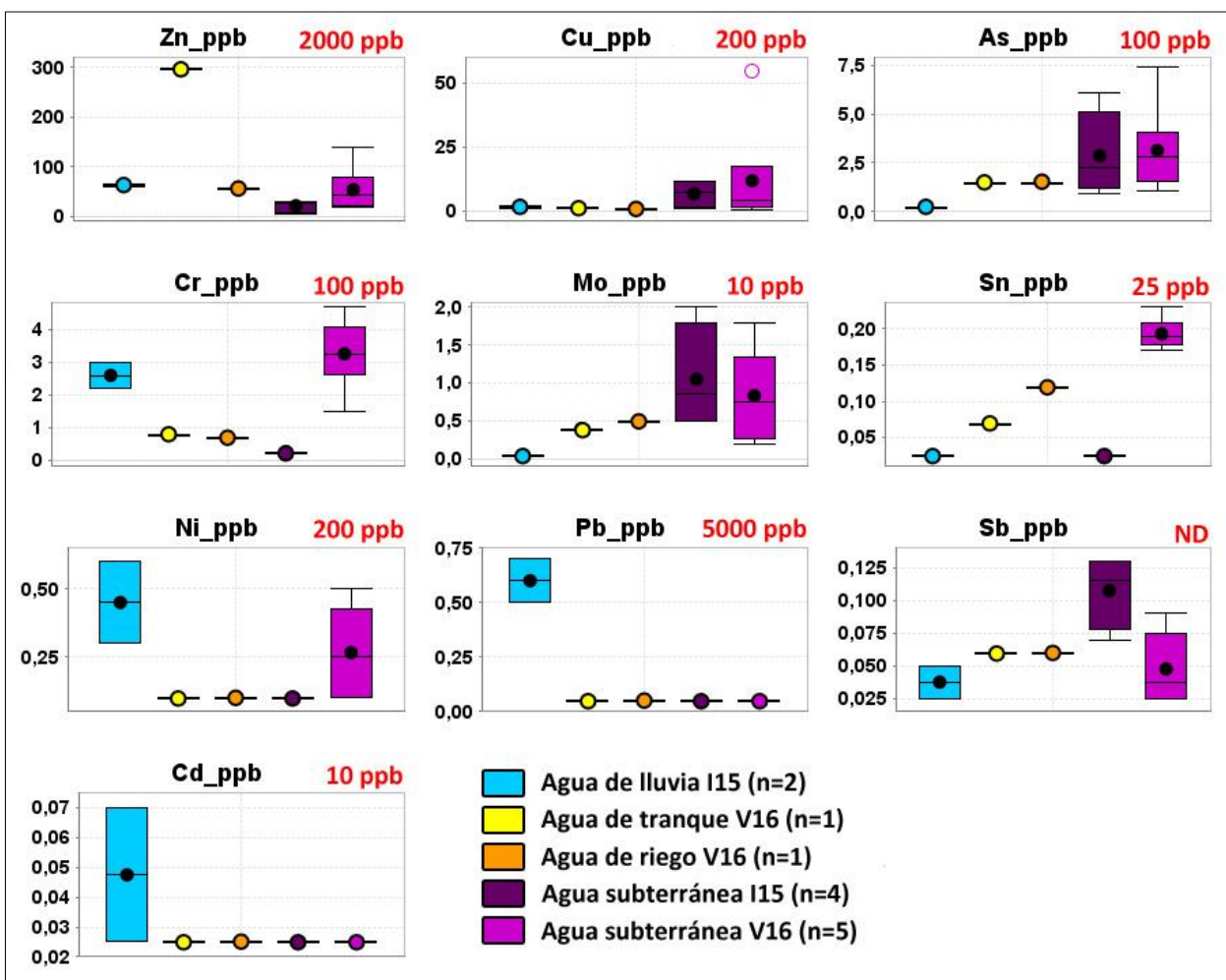


Figura 4.77. Contenidos de metales en las muestras de aguas de San Javier. Valores en rojo corresponden a la Norma chilena N°1333 para aguas de riego (1978).

Por otra parte, las aguas subterráneas muestran las menores concentraciones de Zn, pero también posee los mayores contenidos de Cu, As y Mo, respecto al resto de matrices de aguas. Alta variabilidad en los valores de los metales Cr, Sn y Ni entre ambas temporadas, se debe a que estos elementos no presentan respuesta analítica en las muestras de I14. Finalmente, promedios más altos de Mo y Sb se registran en las aguas subterráneas de invierno de 2015, en relación a las de verano de 2016 (Fig. 4.77).

#### 4.7.6 PERFILES DE SUELO SELECCIONADOS EN SAN JAVIER

En San Javier se eligen los perfiles de suelos de las calicatas Ms-2, Ms-3, Mv-8 y Ms-12, además de la calicata blanco Ms-13. La distribución de los suelos seleccionados se puede observar en la Fig. 4.78. Además para los análisis físicos y químicos de suelo también se considera el suelo Mv-11.

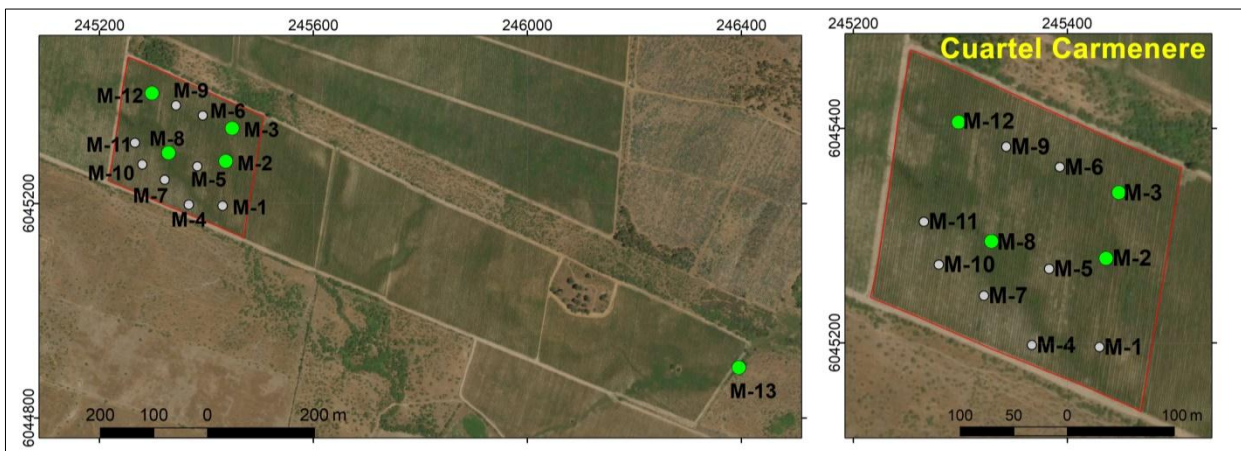


Figura 4.78. Ubicación de calicatas seleccionadas (puntos verdes) en la viña de San Javier.

#### 4.7.6.1 Mineralogía en roca y fracción limo-arcilla en suelos de San Javier

Los resultados de la caracterización mineralógica de la fracción limo-arcilla de los suelos y de la roca parental pulverizada de la viña de San Javier, se exponen en la tabla A4.51 (Anexos) y en la figura 4.79.

El análisis mineralógico de la muestra de roca MR-26, correspondiente a la toba vítrea, muestra una alta abundancia de plagioclasas (83%) y menor proporción de cuarzo (17%) como únicos minerales identificados mediante DRX (Fig. 4.79), cabe destacar que el vidrio volcánico presente en esta roca (Tabla 4.2) no se puede determinar con esta técnica y, por lo tanto, hay una sobrestimación en el contenido de estos minerales.

El perfil de suelo Mv-8, presenta un contenido de 14% de cuarzo (Qz) y 60% de plagioclasa (Pg) en el horizonte C, sin embargo, además se reconocen proporciones menores entre 3 a 6% de otros minerales, tales como feldespato potásico (Feld. K) > chabazita (Chab) > Illita (Ill) > caolinita (Cao) > actinolita (Act) > epidota (Ep). Particularmente Chab es un mineral del grupo de las zeolitas (Deer *et al.* 1992). En los horizontes A y B, se registra la pérdida de Chab, disminución del porcentaje relativo de Pg y Act y aumento de Qz, Illi, Feld. K y Ep. La Cao aumenta en el horizonte B y desaparece en el A (Fig. 4.79).

En los suelos lacustres cultivados (Ms-2, Ms-3 y Ms-6) se registran proporciones similares de Pg y Qz, que varían entre 31 a 48%, con 5 a 10% de Feld. K, 3 a 7% de Ep y menos de 2% de Act (Fig. 4.79). Particularmente, los perfiles de suelo Ms-2 y Ms-3 poseen 6-8% y 7-13% de Illi, respectivamente. Además, la calicata Ms-2 es la única en la que se identifica clorita (Chl) y no se reconoce caolinita, arcilla que si está presente en los perfiles Ms-3 (6-8%) y Ms-6 (7-11%). Por otra parte, en el suelo no cultivado (Ms-13) se tiene una alta proporción de Qz (51-56%) y bajo contenido de Pg (23-30%), respecto a los suelos cultivados, además se miden porcentajes

entre 4 a 9% de Feld. K, Ep e Illi y menores proporciones de Act (1-2%), sin registro de Cao ni Chl (Fig. 4.79).

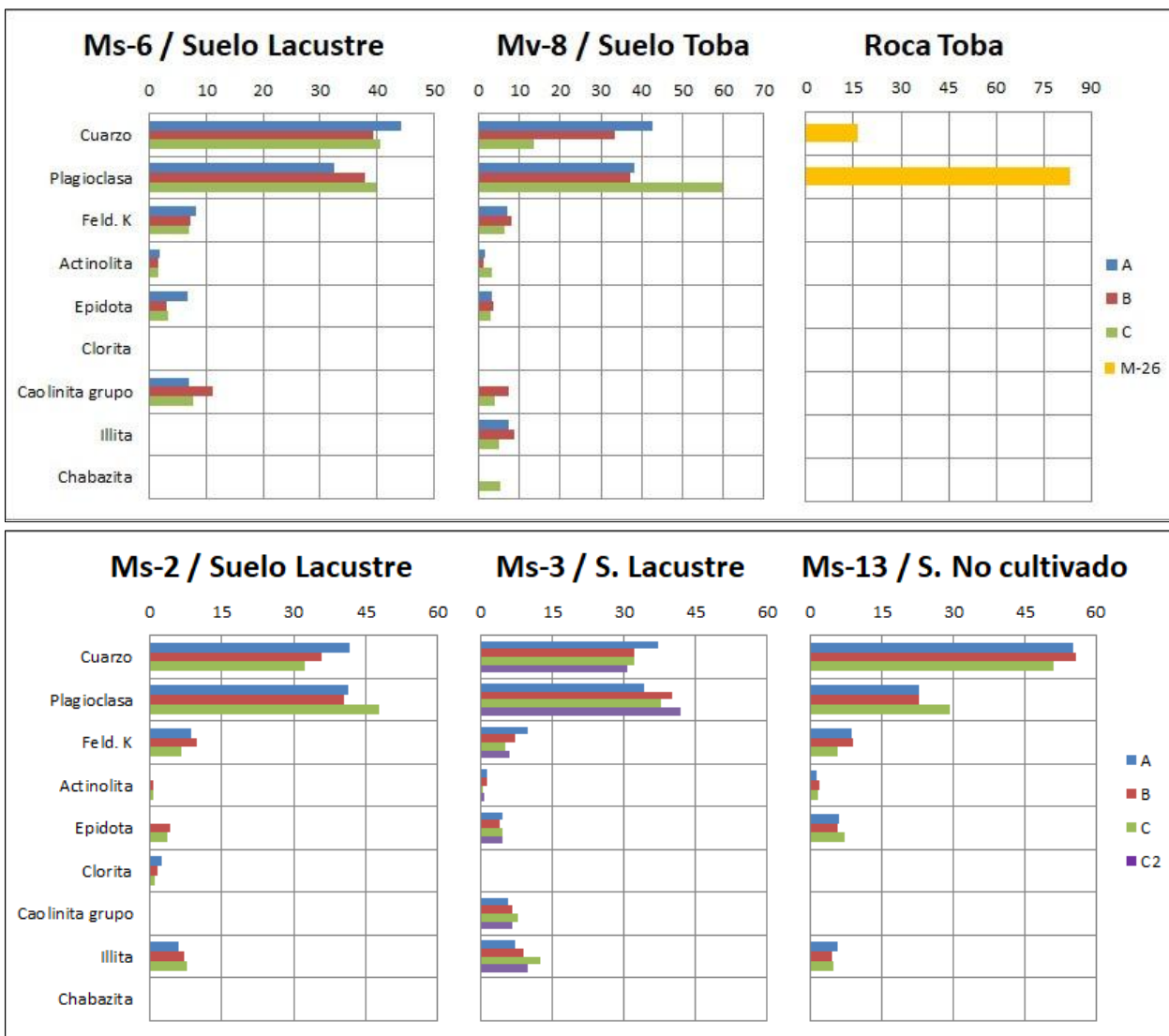


Figura 4.79. Gráficos de barra con la mineralogía presente en la roca parental y en los horizontes A, B, C y C2 de los perfiles de suelo seleccionados en San Javier: (arriba) Ms-6, Mv-8 y roca Toba; (abajo) Ms-2, Ms-3 y Ms-13 suelo No cultivado.

#### 4.7.6.2 Mineralogía de arcillas en San Javier

En San Javier los filosilicatos identificados en la fracción arcilla de los suelos y en el polvo de roca (fracción <74  $\mu\text{m}$ ), se presentan en la tabla A4.52 (Anexos) y en los gráficos de barra de la figura 4.80.

La toba se caracteriza por una mayor abundancia de esmectita (Esm), con moderado contenido de caolinita (Cao) y menor proporción de illita (Illi). Del mismo modo, en el suelo tobáceo (Mv-8)

se reconoce un 5 a 16% de Esm y entre 3 a 11 % de Cao, con valores van disminuyendo con la profundidad, con un 1% de Illi en el horizonte C y un 3% en el horizonte A (Fig. 4.80).

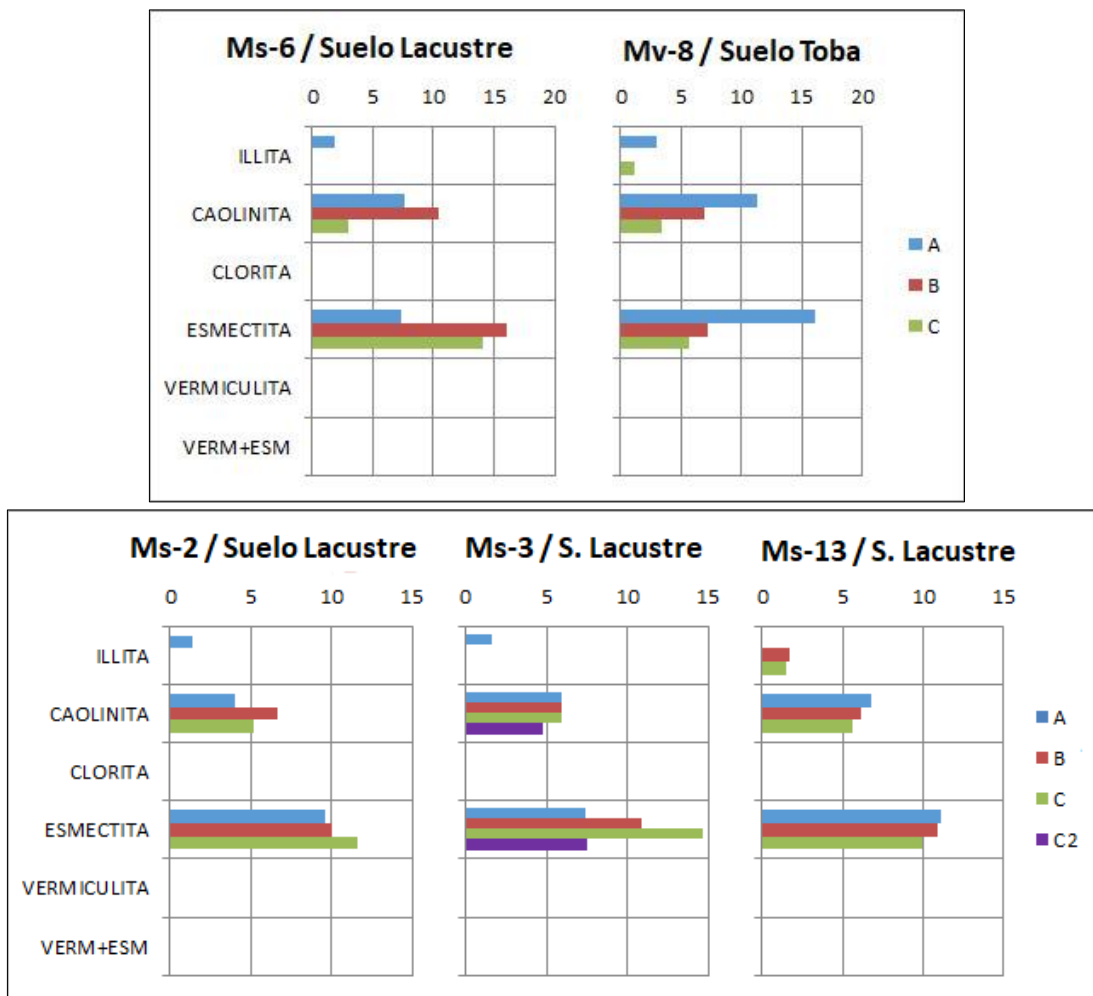


Figura 4.80 Gráficos de barra con la mineralogía de filosilicatos (arcillas) en los horizontes A, B, C y C2 de los perfiles de suelos seleccionados de San Javier: (arriba) Ms-6 y Mv-8; (abajo) Ms-2, Ms-3 y Ms-13 suelo No cultivado. Resultados obtenidos de Salgado (2019).

En los suelos de origen lacustre (Ms-2, Ms-3 y Ms-6) se registra similar distribución de los minerales de arcilla, con valores entre 7 a 16% de Esm y entre 3 a 10% de Cao y con 1 a 2% de Illi que se identifica solamente en el horizonte A. Por el contrario, en el perfil de suelo no cultivado (Ms-13) sólo se mide Illi en los horizontes B y C (~ 2%), con similares contenidos, en todos los horizontes, de Esm (10-11%) y Cao (6-7%), aunque con un leve aumento de los valores hacia la superficie (Fig. 4.80).

#### 4.7.6.3 Propiedades físicas y químicas del suelo en San Javier

Los suelos que se desarrollan sobre la toba (Mv-8 y Mv-11) presentan altos contenidos de partículas tamaño limo (43 a 56%), con mayor porcentaje de arcilla en los horizontes A y mayor



partículas tamaño arena en los horizontes B y C (Fig. A4.8), las texturas varían desde franco arcilloso a franco en el perfil Mv-8 y franco limoso en la calicata Mv-11 (Tabla A4.53; Anexos). La densidad aparente (Da) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) son muy diferentes entre ambos perfiles (Fig. 4.81), por una parte, Mv-8 presenta una Da entre 1,32 a 1,68 g/cc y entre 7 a 18,5 meq/100g de CIC, mientras que Mv-11 posee una Da con valores más acotados entre 1,37-1,53 g/cc y con CIC menores entre 3,8 a 9,9 meq/100g (Tabla A4.53; Anexos). El contenido de materia orgánica (MO) es más alto en los horizontes A (Fig. 4.81) con un promedio de 1,59% y una media muy baja de 0,06% de MO en los horizontes B y C (Tabla 4.10).

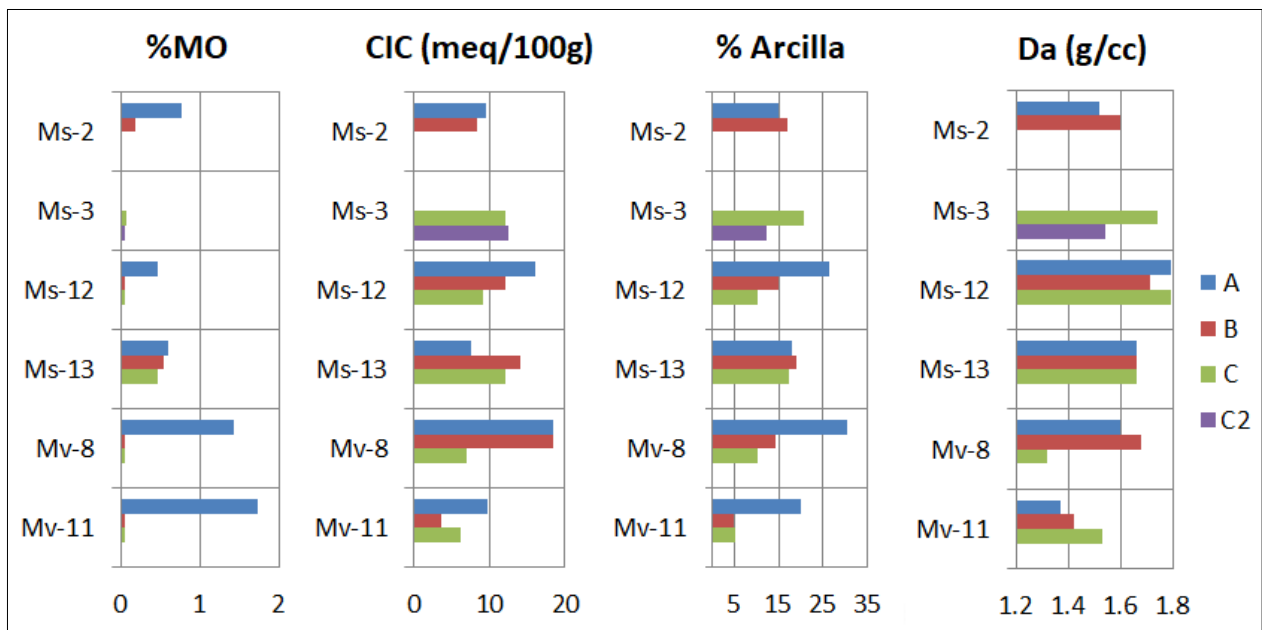


Fig. 4.81. Contenido de materia orgánica (%MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), arcillas (% Arcilla) y densidad aparente (Da) en los suelos seleccionados y en los horizontes A, B, C y C2 en San Javier.

Tabla 4.10. Estadísticas del contenido de materia orgánica (%MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los suelos seleccionados de origen lacustre (Ms-2, Ms-3, Ms-12) y volcánico (Mv-8, Mv-11) y en el suelos no cultivados (Ms-13), datos en general y por horizontes. Viña de San Javier.

	% MO			CIC (meq/100g)		
	Blanco (Ms-13)	Lacustre (Ms)	Volcánico (Mv)	Blanco (Ms-13)	Lacustre (Ms)	Volcánico (Mv)
<b>Max</b>	0.60	0.77	1.73	14.2	16.1	18.5
<b>Min</b>	0.47	0.05	0.06	7.7	8.5	3.8
<b>Rango</b>	0.13	0.72	1.67	6.5	7.6	14.7
<b>Media</b>	<b>0.54</b>	<b>0.24</b>	<b>0.57</b>	<b>11.4</b>	<b>11.5</b>	<b>10.7</b>
<b>Desv. Est.</b>	0.07	0.28	0.79	3.3	2.6	6.4
<b>̄ X Horiz A</b>	<b>0.60</b>	<b>0.62</b>	<b>1.59</b>	<b>7.7</b>	<b>12.9</b>	<b>14.2</b>
<b>̄ X Horiz B</b>	<b>0.55</b>	<b>0.10</b>	<b>0.06</b>	<b>14.2</b>	<b>10.9</b>	<b>11.2</b>
<b>̄ X Horiz C</b>	<b>0.47</b>	<b>0.06</b>	<b>0.06</b>	<b>12.2</b>	<b>11.0</b>	<b>6.6</b>

Los suelos desarrollados sobre el material parental de origen lacustre-aluvial: Ms-2, Ms-3 y Ms-12 muestran bastantes variaciones en todas las propiedades determinadas (Fig. 4.81). Particularmente, dada la similitud estratigráfica de los perfiles de suelo Ms-2 y Ms-3, se muestrean solamente los horizontes A y B del perfil Ms-2, correspondientes a un conglomerado y a depósitos de grano muy fino y aspecto coloidal, respectivamente; y los horizontes C y C2 del perfil Ms-3, los cuales son capas de conglomerado (C) y de la toba subyacente (C2). Por este motivo ambas mediciones pueden integrarse como un sólo perfil de suelo. El perfil Ms-12 por su parte, presenta una capa (horizonte A) de material muy fino (coloidal) y los horizontes B y C corresponden a una capa de conglomerado (Fig. 4.67).

De esta manera, la textura de los suelos Ms varían de franco a franco arenoso-arcilloso en los perfiles Ms-2 y Ms-3 y franco a franco arenoso en el perfil Ms-12 (Tabla A.53; Anexos), cabe destacar que el mayor contenido de arena aparece en los horizontes conglomerádicos (Fig. A4.8; Anexos). La  $D_a$  y la CIC es diferente en ambos perfiles, fluctuando entre 1,52 y 1,74 g/cc de  $D_a$  y 8,5 a 12,6 meq/100g de CIC en Ms-2/Ms-3 y entre 1,71 a 1,79 g/cc de  $D_a$  y entre 9,3 a 16,1 meq/100g de CIC en el perfil Ms-12. La materia orgánica es moderadamente más alta en el horizonte A ( $\bar{x}_{MO}$ : 0,62%) y baja en los horizontes B ( $\bar{x}_{MO}$ : 0,1%) y C ( $\bar{x}_{MO}$ : 0,06%).

Finalmente, el perfil de suelo no cultivado (Ms-13) con un perfil de suelo bastante homogéneo, correspondiente al material fino coloidal (Fig. 4.67), tiene contenidos muy similares entre horizontes en los porcentajes de arena, limo y arcilla (Fig. A4.8; Anexos), por lo tanto, se reconoce la misma textura (Franco) y además igual  $D_a$  (1,66 g/cc) en todos los horizontes. El contenido de MO tampoco varía considerablemente entre los horizontes desde 0,6% en A, 0,55% en B y 0,47% en C, mientras que la CIC es más baja en el horizonte A (7,7 meq/100g) que en los horizontes B (14,2 meq/100g) y C (12,2 meq/100g).

## CAPITULO 5. RELACIÓN GEOQUÍMICA ENTRE ROCA Y SUELO: ELEMENTOS DE LAS TIERRAS RARAS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

Las tierras raras (REE) corresponden a un grupo de 14 elementos (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) que poseen un comportamiento geoquímico coherente y que han sido usados para trazar procesos pedogenéticos (e.g. Zaharescu *et al.* 2017; Laveuf *et al.* 2008; Compton *et al.* 2003) y meteorización química en distintas litologías (e.g. Babechuk *et al.* 2014; Ma *et al.* 2011; Condie *et al.* 1995; Braun *et al.* 1993). La ventaja en el uso de estos elementos en pedogénesis y meteorización química, radica en que poseen un origen mayormente litogénico, con restringidas fuentes antrópicas y, que a pesar de evolucionar como un grupo, las REE experimentan fraccionamiento diferencial y muestran anomalías (por ejemplo de Ce y Eu) que han demostrado ser inducidas por estos procesos (Laveuf & Cornu 2009).

Además, las REE pueden ser útiles para trazar procesos exógenos dada la preferencia de algunas REE por formar parte de minerales secundarios del suelo (Laveuf & Cornu 2009) y/o debido a la movilidad particular de algunos de estos elementos durante la meteorización de silicatos (Ma *et al.* 2011). Cabe destacar que este tipo de relaciones es difícil de determinar con elementos mayores (por ejemplo con nutrientes) dada su mayor movilidad durante la pedogénesis (Laveuf & Cornu 2009) y su fuerte fraccionamiento por las plantas. Sin embargo, el consumo de REE por plantas ha sido ampliamente documentado (e.g. Zaharezcu *et al.* 2017; Tyler 2004; Markert & Li 1991), así como también, específicamente en plantas de *Vitis vinífera L.* (e.g. Pisciotta *et al.* 2017; Pepi *et al.* 2016; Censi *et al.* 2014; Bertoldi *et al.* 2009). Además se ha reportado que el consumo de REE por las plantas genera modificaciones en la distribución de estos elementos en el suelo (Zaharezcu *et al.* 2017; Laveuf & Cornu 2009).

Algunas fuentes antrópicas en zonas de cultivo podrían provenir del uso de agroquímicos (Hu *et al.* 2006; Tyler 2004), particularmente en China el uso de REE como fertilizante es una práctica común (e.g. Kahn *et al.* 2016; Pang *et al.* 2002) y el efecto en la agricultura ha sido intensamente investigado por autores de este país (Hu *et al.* 2004 y sus referencias). En Chile la utilización de estos productos no es habitual, o bien, no ha sido documentado.

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir del análisis geoquímico en muestras de rocas y suelos de los elementos del grupo de las tierras raras, comúnmente conocidas con la sigla en inglés “REE”. Los resultados son analizados con el objetivo de responder a la primera y segunda preguntas científicas planteadas en esta tesis, a recordar:

¿Cuál es la influencia relativa del material parental y de la actividad antrópica en las actuales condiciones de equilibrio del suelo? y ¿Cuáles procesos geoquímicos están ocurriendo en los suelos en estudio? Para esto se utiliza la roca parental como material base a partir del cual los elementos en estudio evolucionan en la geoquímica del suelo total y en la fase biodisponible.

Parte de este capítulo es tratado en la publicación científica, en preparación, “Rare earth elements geochemistry and mineralogical transformations from granitic parent materials to soils in two vineyards of Central Chile: Lithogenic, Pedogenetic and Antropogenic Influences”.

Para trazar la relación geoquímica existente entre las rocas y los suelos que se desarrollan a partir de éstas, en las cuatro áreas de trabajo, se utilizan patrones de REE comparativos entre la roca parental y los suelos, además del análisis de los patrones y valores medios comparativos del coeficiente de transferencia de masa ( $T$ ). Adicionalmente, se busca identificar procesos de óxido-reducción que pueden estar ocurriendo en el sistema suelo, a partir del fraccionamiento de Ce, así como procesos de meteorización que pueden evaluarse mediante la anomalía de Eu, tal como ha sido planteado y realizado en los trabajos antes citados.

## 5.2 ANÁLISIS DE DATOS

En esta sección se utilizan gráficos multielemento con las concentraciones de REE de las rocas y suelos normalizadas, con el fin de comparar los patrones de distribución de estos elementos. Además se utiliza la suma de las REE ( $\Sigma$ REE), para considerar la concentración de todas las REE como grupo en un determinado material (suelos o rocas). Para evaluar cuantitativamente el fraccionamiento o enriquecimiento entre REE livianas (LREE: La, Ce, Pr, Nd), REE medianas (Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho) y REE pesadas (HREE: Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) en los suelos, se utilizan las ecuaciones propuestas en McLennan (1989) y Ma *et al.* (2011), estas son: la razón  $[La/Lu]_N$  para evaluar la relación entre LREE y HREE (LREE/HREE), donde  $N$  indica que ambos elementos están normalizadas por la concentración del elemento respectivo en la roca parental. Para determinar el enriquecimiento de MREE se utiliza el factor  $[Gd/Gd^*]_N$  o  $MREE^*$ , el cual es calculado a través del contenido de Gd en el suelo, normalizado por el Gd en la roca parental, respecto a la media geométrica de los contenidos de La y Lu, también normalizados a la roca parental, según la ecuación:  $[Gd]_N / [La_N \times Lu_N]^{1/2}$ . Finalmente se calculan las anomalías de cerio ( $Ce^*$ ) y europio ( $Eu^*$ ) por medio de los valores  $[Ce/Ce^*]_N$  y  $[Eu/Eu^*]_N$ , los que se definen por  $[Ce]_N / [La_N \times Pr_N]^{1/2}$  y  $[Eu]_N / [Sm_N \times Gd_N]^{1/2}$ , respectivamente. Para la fase biodisponible de REE en los suelos, la técnica MMI no mide el contenido de Lu, por este motivo, las ecuaciones serán calculadas utilizando el valor  $Yb_N$ , en remplazo de  $Lu_N$ .



Para evaluar la movilidad y el fraccionamiento de las tierras raras ( $j$ ) entre la roca ( $p$ ) y el suelo ( $w$ ), se emplea el coeficiente de transferencia de masa  $\tau_{ij}$  (Brimhall & Dietrich 1987), que utiliza la concentración ( $C$ ) de un elemento inmóvil ( $i$ ), como Ti o Zr, para comparar la pérdida o ganancia de cada elemento del grupo de las tierras raras, en el perfil de suelo y entre los diferentes suelos en estudio.

$$\tau_{ij} = \frac{C_{j.w}}{C_{j.p}} \cdot \frac{C_{i.p}}{C_{i.w}} - 1 \quad (5.1)$$

En este caso, se evalúa la distribución de los elementos Si, Zr y Ti en los diferentes rocas y suelos en estudio, comprobándose que Ti es el elemento con menos variación en las cuatro viñas y entre los suelos en estudio en cada área, por lo que se elige como elemento inmóvil a usar en la ecuación (5.1).

Por su parte el porcentaje de biodisponibilidad de REE en el suelo se determina por medio de la ecuación descrita en Mann *et al.* (2012) y Albanese (2008):

$$\% \text{ Biodisponibilidad} = A/B \times 100 \quad (5.2)$$

Donde  $A$  y  $B$  son las concentraciones de un determinado elemento en  $A$ , la fase biodisponible del suelo, y en  $B$ , la química total del suelo.

El análisis específico de los patrones de REE y de los índices  $\Sigma$ REE, LREE/HREE, MREE\*, Ce\* y Eu\*, se realiza de forma separada para cada viña, con el fin de determinar patrones diferenciales en los distintos cuarteles o materiales parentales analizados, que indiquen procesos pedogenéticos particulares. También, estos valores se analizan de forma comparativa entre las cuatro viñas, con el objetivo de definir patrones comunes o discordantes, que permitan evaluar al grupo de las REE como trazadores del material parental en suelos.

## 5.3 RESULTADOS

### 5.3.1 CONTROL DE CALIDAD

A partir del control de calidad de los datos realizado en el Capítulo 4 se determina que el grupo de elementos de las tierras raras poseen un alto grado de confianza (%CV<sub>T</sub>: 5,6-10,7%) tanto en suelo total, como en la dos temporadas de la fase biodisponible (Tabla A4.1). Para las muestras de aguas, también se realizan análisis de REEs, sin embargo, esta matriz no tiene una respuesta analítica satisfactoria para estos elementos (Tabla A4.3).

### 5.3.2 PATRONES DE REE EN ROCAS PARENTALES

El patrón de REE permite reconocer rocas de un mismo origen o que han experimentado procesos afines de diferenciación, alteración y/o formación; bajo esta misma idea, se pretende caracterizar a las rocas parentales en estudio según sus patrones de REE con el objetivo de diferenciarlas respecto a su origen y tipo de roca. Para esto se despliegan los patrones de REE de las rocas parentales de las cuatro viñas en estudio por medio de gráficos multielemento (Fig. 5.1) normalizados al Condrito (Taylor & McLennan 1985) y al Promedio global de suelos, recopilado por Kabata-Pendias (2011). Los contenidos de REE en las rocas parentales se presentan en la tabla A5.1 (Anexos).

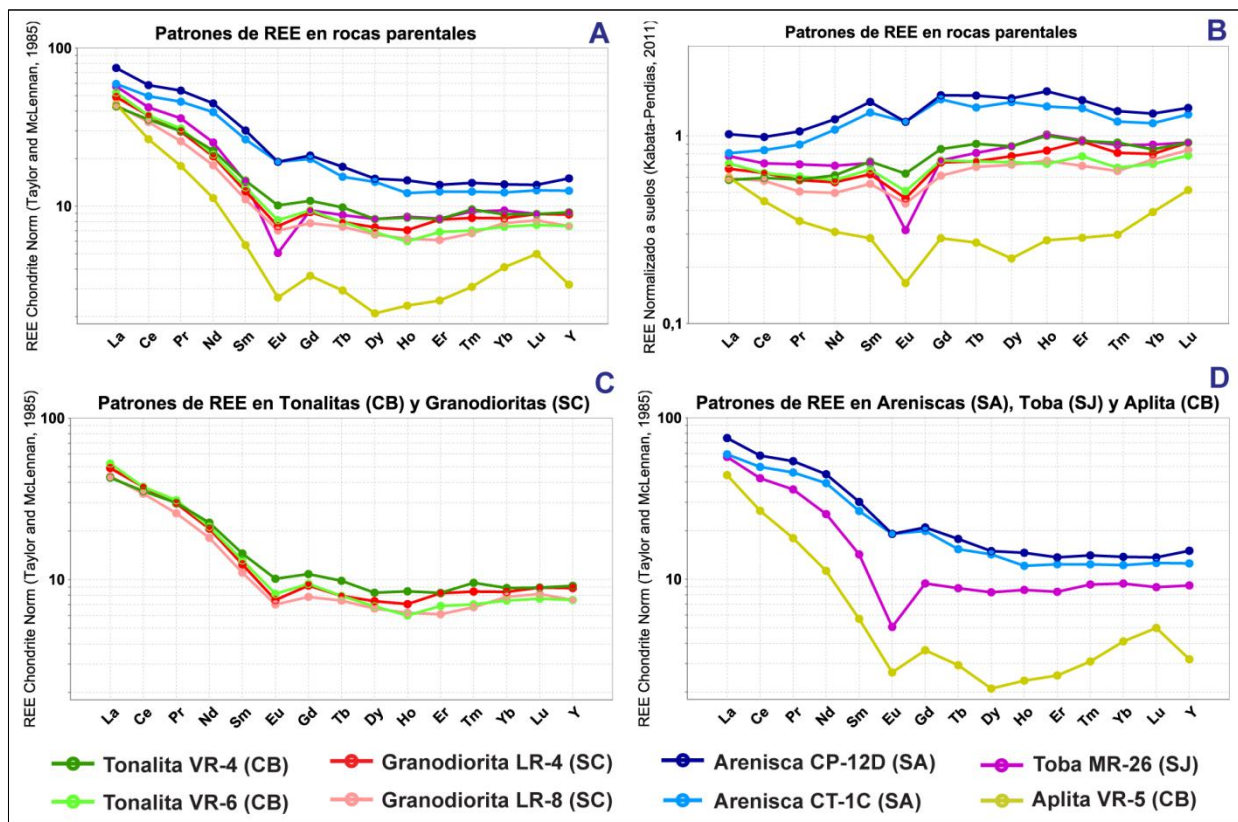


Figura 5.1 (A) Patrones de tierras raras (REE) para las rocas parentales de los suelos de las cuatro viñas normalizados al Condrito y (B) al Promedio global de suelos (Kabata-Pendias 2011). (C) Patrón de REE para Tonalitas de Casablanca (CB) y Granodioritas de Santa Cruz (SC). (D) Patrón de REE para Arenisca de San Antonio (SA), Toba de San Javier (SJ) y Aplita de Casablanca (CB).

A partir de las figuras 5.1A, 5.1B y 5.1C es posible observar que los patrones de REE de los granitoides de Casablanca y Santa Cruz son relativamente similares, con  $\Sigma$ REE de 88 ppm y 83 ppm, respectivamente, indicando que la litología de un material parental similar puede reconocerse mediante el uso de este grupo de elementos. Por su parte, los patrones de las areniscas en San Antonio ( $\Sigma$ REE= 153 ppm), de la Toba de San Javier ( $\Sigma$ REE= 100 ppm) y de

la Aplita de Casablanca ( $\Sigma\text{REE} = 58$  ppm), son característicos de cada litología, pero manteniendo una tendencia clara (Fig. 5.1D), que corresponde al patrón típico para las rocas de la corteza continental superior (Rudnick & Fountain 1995; Taylor & McLennan 1995), con un enriquecimiento de LREE respecto de las HREE y con anomalías negativas de Eu, para todas las rocas en estudio, al normalizarlas al condrito (Figs. 5.1A, 5.1C y 5.1D).

Cabe destacar que las rocas sedimentarias de San Antonio están enriquecidas en REE, respecto al resto de rocas analizadas (Figs. 5.1A y 5.1B), característico de rocas clásticas de grano fino (Taylor & McLennan 1995), mientras que la roca piroclástica de San Javier muestra valores muy cercanos, aunque levemente superiores, a las rocas graníticas de Casablanca y Santa Cruz, pero con una anomalía negativa de  $\text{Eu}^*$  más pronunciada. Finalmente el dique aplítico, compuesto mayoritariamente por cuarzo y feldespato potásico, minerales con nulo a bajo contenido de REE, presentan el patrón más empobrecido (Figs. 5.1A, 5.1B, 5.1C).

### 5.3.3 GEOQUÍMICA DE REE EN CASABLANCA: RELACIÓN ROCA-SUELO

#### 5.3.3.1 Geoquímica de REE en suelo total en Casablanca

Para visualizar en detalle la relación entre la roca parental, que corresponde a la roca en estado fresco, y los suelos desarrollados en los cuarteles en estudio de la viña de Casablanca, se realizan diagramas multielemento normalizados al promedio global de suelos (Kabata-Pendias 2011) que muestra el patrón de REE para el promedio de las dos muestras de Tonalita, para los suelos de los cuarteles Piedemonte y Cerro, para el “suelo blanco” (Fig. 5.2A) del perfil de suelo VP-13 y para la muestra de Aplita y sus suelos generados, reconocidos en la calicata VC-9 (Fig. 5.2B).

Los resultados indican que todos los suelos de Casablanca están en promedio enriquecidos en REE respecto a la roca parental tonalítica ( $\Sigma\text{REE} = 88$  ppm), aunque manteniendo en promedio un patrón similar al de la roca (Fig. 5.2A). Específicamente, los suelos del cuartel Piedemonte (VP) desarrollados sobre depósitos aluviales ( $\Sigma\text{REE} = 94\text{-}112$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}} = 103,6$  ppm) y depósitos de remoción en masa ( $\Sigma\text{REE} = 75\text{-}116$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}} = 101,5$  ppm) están empobrecidos en REE, respecto a los suelos del cuartel Cerro (VC) tanto los desarrollados sobre la tonalita ( $\Sigma\text{REE} = 114\text{-}130$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}} = 121,7$  ppm) como los del depósito coluvial ( $\Sigma\text{REE} = 107\text{-}118$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}} = 112,8$  ppm) y, estos a su vez, están empobrecidos en REEs, en relación al suelo no cultivado ( $\Sigma\text{REE} = 152\text{-}176$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}} = 160,5$  ppm) del cuartel VP (Tabla A5.2; Anexos).

Además es posible apreciar que en la medida en que aumenta el contenido de REE en los suelos, la anomalía negativa de  $\text{Eu}^*$ , respecto a la roca parental, se vuelve más pronunciada,

desde los suelos cultivados del cuartel Pendiente ( $Eu^* = 1,0$  y  $0,98$ ) que tienen el menor  $\Sigma REE$  de los suelos, pasando por el suelo formado sobre tonalita ( $Eu^* = 0,87$ ) y hasta el suelo no cultivado ( $Eu^* = 0,85$ ). Las anomalías de  $Ce^*$  son descartables, con una leve anomalía positiva ( $Ce^* = 1,08$ ) en los suelos desarrollados sobre depósitos aluviales (VP) y sobre el depósito coluvial ( $Ce^* = 1,05$ ) del cuartel Cerro (Tabla A5.2; Anexos).

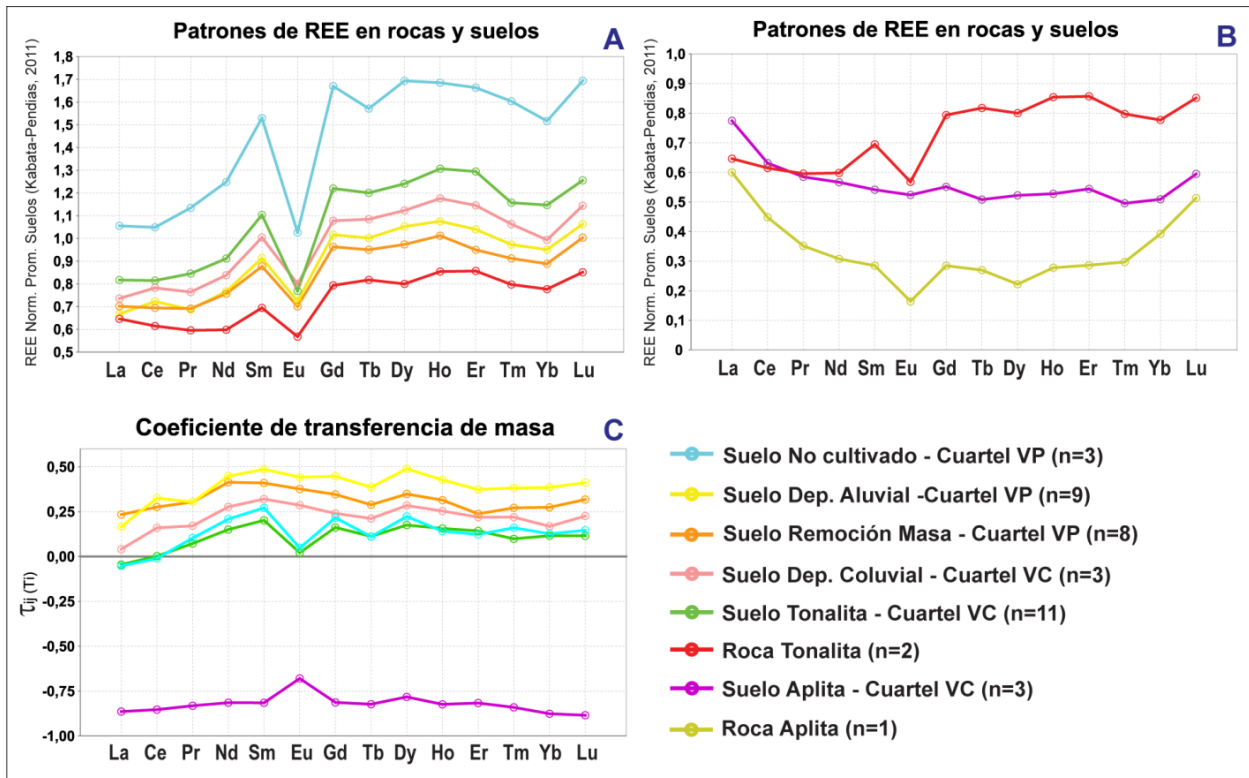


Figura 5.2. Comparación de patrones promedio de tierras raras (REE) entre roca parental y suelos en viña de Casablanca, normalizado al Promedio global de suelos (Kabata-Pendias 2011). (A) Roca Tonalita, suelo blanco (No cultivado) y suelos de cuarteles Cerro (VC) y Piedemonte (VP); (B) Rocas Aplita y Tonalita y suelo desarrollado sobre Aplita en Cuartel Cerro. (C) Coeficiente de transferencia de masa ( $\tau$ ), respecto a roca parental y Ti como elemento inmóvil, de los suelos de Casablanca.

Por su parte, la roca Aplita ( $\Sigma REE = 58$  ppm) con un patrón de REE muy diferente a la Tonalita (Fig. 5.2B), genera un suelo con una distribución de REE, respecto a la Aplita parental, enriquecido en LREE ( $LREE/HREE = 1,18$ ) y en MREE ( $MREE^* = 1,56$ ) y con una considerable anomalía positiva de Eu ( $Eu^* = 1,72$ ; Tabla A5.2; Anexos).

Los coeficientes de transferencia de masa calculados en Casablanca indican un enriquecimiento de REE para todos los suelos cuyo material parental es de composición tonalítica (Fig. 5.2C), sin embargo, para el suelo desarrollado sobre la aplita se tienen valores de  $T$  negativos, lo que indicaría un mayor empobrecimiento en REE en el perfil de suelo. No obstante, estos valores negativos están fuertemente influenciados por la baja concentración de Ti medido en la roca (0,02%; Tabla A4.5; Anexos), respecto a los valores de Ti medidos en los



suelos aplíticos (0,11 a 0,26%; Tabla A4.7; Anexos). La diferencia en el contenido de Ti, en la roca y en los suelos, es un factor a considerar en este tipo de interpretaciones.

Los suelos cultivados desarrollados *insitu* sobre la tonalita en el cuartel VC y el suelo no cultivado del cuartel VP, muestran patrones del coeficiente  $T$  similares y menos enriquecidos para todas la REE, con  $T$  cercano a cero para Eu y Ce, que indica una nula movilidad de estos elementos en el suelo. Por otra parte, los suelos desarrollados en el depósito coluvial del cuartel Cerro y en los depósitos de remoción en masa y aluvial del cuartel Piedemonte, muestran un mayor enriquecimiento en REE. Un aumento paulatino en los valores  $T$  hacia las MREE y HREE y menores valores para las LREE (La a Pr) se observan en todos estos suelos, destacando el mayor enriquecimiento en Ce y en REE medianas y pesadas en los suelos aluviales (Fig. 5.2C).

### 5.3.3.2 Geoquímica de REE biodisponibles en Casablanca

Para la distribución de REE biodisponibles en todos los suelos de Casablanca (Fig. 5.3), se observa en general un patrón de empobrecimiento en LREE (La, Ce, Pr y Nd) en relación a una distribución más estable de las REE medianas (MREE: Sm, Eu, Gd, Tb y Dy) y pesadas (HREE: Er e Yb). Esto puede evidenciarse para todos los suelos y en ambas temporadas de medición, por bajos valores de LREE/HREE, los que varían entre 0,17 y 0,32, y por un enriquecimiento de MREE respecto a LREE y HREE, con altos índices de MREE\* variando desde 3,15 para el suelo de remoción en masa en la temporada V15, hasta 5,11 para el suelo proveniente de Aplita en V16 (Tabla A5.3; Anexos).

Las anomalías de Ce\* son en general positivas, con los mayores valores medidos en los suelos del cuartel Piedemonte (Ce\*=1,19 a 2,07), respecto a los del cuartel cerro (Ce\*=0.89 a 1.31), en ambas temporadas de medición. En cuanto a las anomalías de Eu\* estas son negativas para todos los suelos (Eu\*=0,82 a 0,87), excepto para los suelos aplíticos (Eu\*= 1,18 en V15 y 1,21 en V16; Tabla A5.3; Anexos).

En las figuras 5.3 se observan notorias diferencias en los patrones de REE en la fase biodiponible del suelo entre ambos horizontes medidos; con patrones de REE enriquecidos en el horizonte A, respecto al horizonte B, para todos los tipos de suelos cultivados y en las dos temporadas de medición. Para el suelo blanco en cambio, se presentan patrones menos diferenciados entre ambos horizontes, aunque levemente más enriquecido en el horizonte B.

Lo mismo se observa la considerar el porcentaje de biodisponibilidad del grupo de las tierras raras en los suelos de Casablanca, en primer lugar, mayor biodisponibilidad (%) en las REE medianas y pesadas (Nd a Yb), respecto a las livianas (La a Pr) para todos los suelos. Por otra

parte, se reconoce una notoria alta biodisponibilidad promedio (1,9 a 5,5%) en el horizonte A de los suelos aluviales medidos en la temporada V16 (línea amarilla continua; Fig. 5.3C), en el cuartel Piedemonte. Similares porcentajes de biodisponibilidad (1,5 a 6,5%) ocurren también en el horizonte A del suelo aplítico en ambas temporadas (líneas violeta claro; Fig. 5.3D) y además alto porcentaje de biodisponibilidad (1,6-6.8%) para las REE medianas y pesadas (Nd-Yb) en el horizonte B del suelo aplítico de la temporada V15.

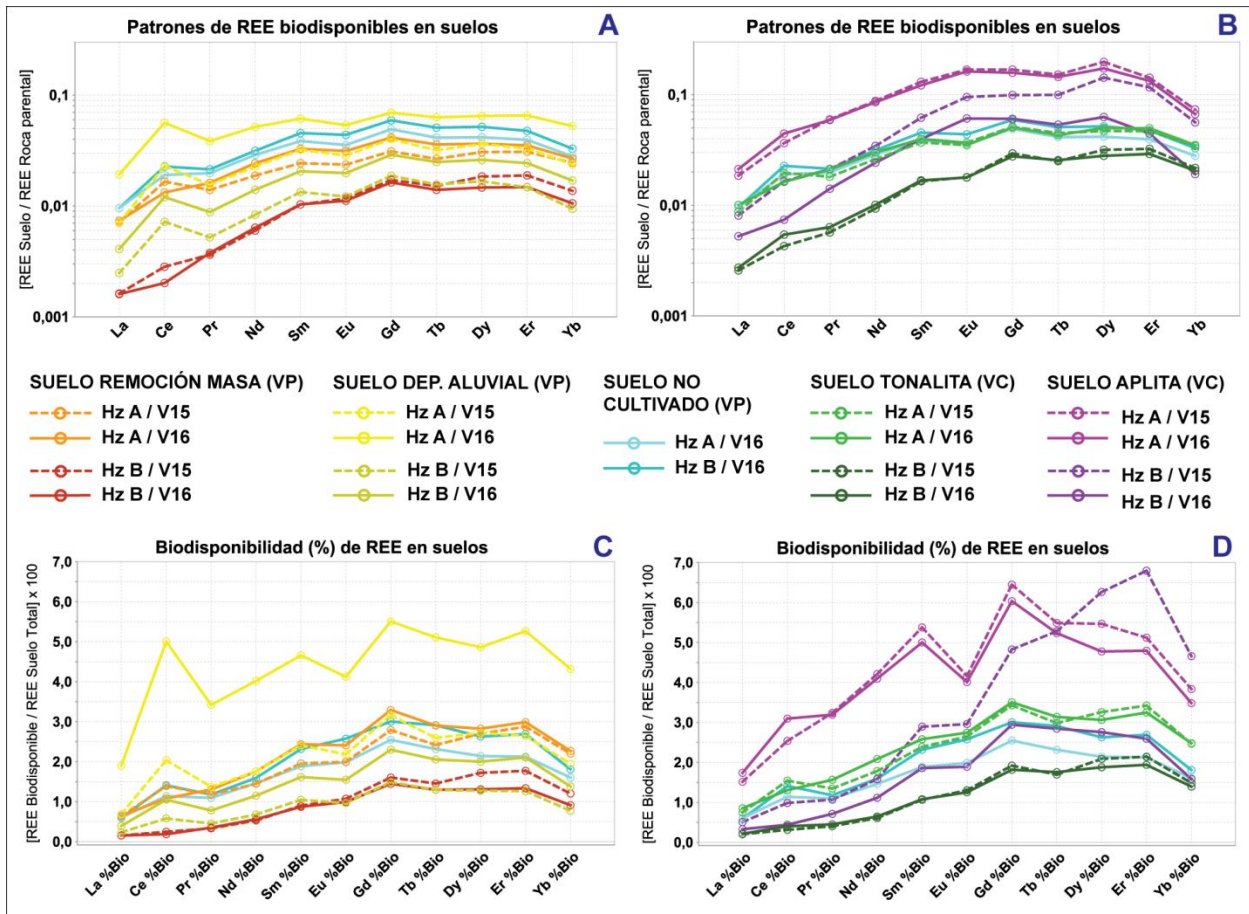


Figura 5.3. Patrones promedio de REE en la fase biodisponible de los suelos de Casablanca normalizados a la roca parental, medidas en la temporadas Verano 2015 (V15) y Verano 2016 (V16) y en los horizontes A (Hz A) y B (Hz B) de los suelos del (A) Cuartel Piedemonte y (B) Cuartel Cerro. Porcentaje de biodisponibilidad de las REE en los horizontes A y B y en las temporadas V15 y V16 de los suelos de (C) Cuartel Piedemonte (D) Cuartel Cerro.

Diferencias entre las temporadas V15 y V16 se reconocen en los horizontes A y B del suelo desarrollado sobre el depósito aluvial, en el cuartel Piedemonte (Figs 5.3A y 5.3C), en ambos horizontes se mide un mayor contenido de REE en la temporada V16; mientras que en el horizonte B de los suelos formados directamente sobre la aplita, en el cuartel Cerro (Figs. 5.3B y 5.3C), se reconoce un patrón de REE más enriquecido en la fase biodisponible de la temporada V15.

### 5.3.4 GEOQUÍMICA DE REE EN SAN ANTONIO: RELACIÓN ROCA-SUELO

#### 5.3.4.1 Geoquímica de REE en suelo total en San Antonio

Los diagramas multielemento que comparan los patrones de REE de las areniscas parentales (CP-12D y CT-1C), de los suelos en los cuarteles Terraza (CT) y Pendiente (CP) de San Antonio y del “suelo blanco” (no cultivado) de material parental conglomerádico, así como los coeficientes de transferencia de masa, se presentan en la figura 5.4. Los contenidos medios de REE en suelo y los índices de REE calculados, se encuentran en la Tabla A5.6 (Anexos). Dado la mineralogía de las rocas y suelos, se determina que para los suelos del cuartel Pendiente (CP) el material parental es la arenisca CP-12D, mientras que para los suelos del cuartel Terraza (CT) y el suelo no cultivado (C-13), la arenisca de la muestra CT-1C se considera como roca parental.

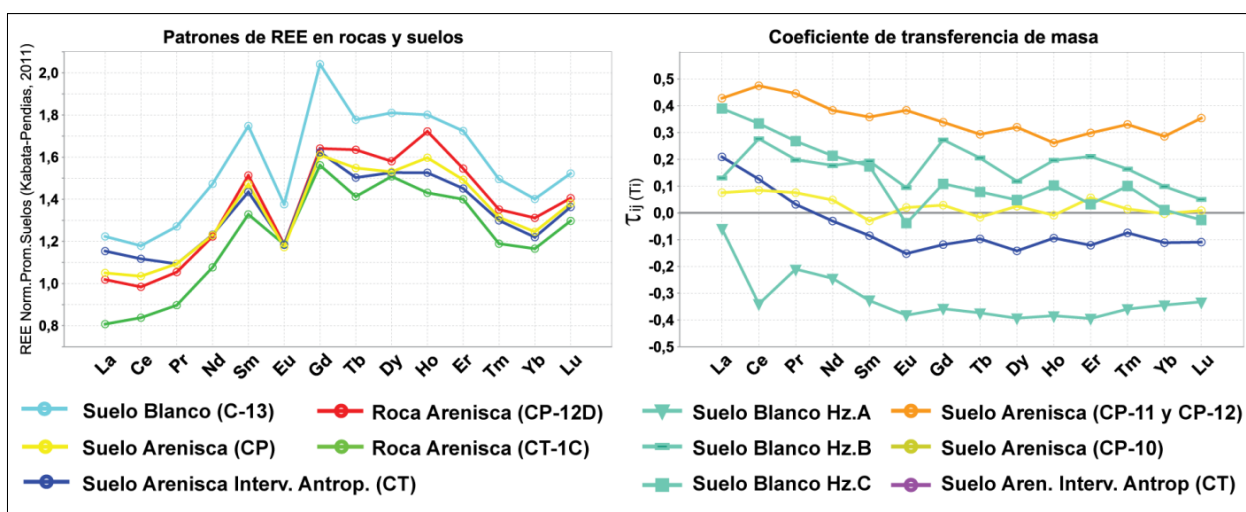


Figura 5.4 (A) Comparación de los patrones de tierras raras, normalizado al promedio global de suelos (Kabata-Pendias 2011), de la roca parental y de los suelos (valor promedio) de San Antonio. (B) Coeficiente de transferencia de masa ( $\tau$ ), de los suelos de San Antonio, con Ti como elemento inmóvil.

Al observar los patrones de REE se reconoce de manera general un patrón de REE similar tanto para las rocas parentales, como para los suelos cultivados y no cultivados. En el detalle, es posible determinar que la roca arenisca CP-12D ( $\Sigma\text{REE}= 153$  ppm) posee un patrón más enriquecido en REE que la arenisca CT-1C ( $\Sigma\text{REE}=131$  ppm), pero, en general, los suelos de los cuarteles Terraza ( $\Sigma\text{REE}= 119\text{-}184$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}}= 162$  ppm) y Pendiente ( $\Sigma\text{REE}= 132\text{-}181$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}}= 156$  ppm) presentan patrones de REE que se sitúan entre ambas rocas parentales (Fig. 5.4A). Sin embargo, el “suelo blanco” ( $\Sigma\text{REE}= 150\text{-}199$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}}= 183$  ppm) muestra un enriquecimiento en el patrón de REE (Tabla A5.6; Anexos).

Por otra parte, un leve enriquecimiento en LREE, respecto a las rocas parentales, se miden en los suelos más intervenidos (línea azul), correspondientes a los del cuartel Terraza (LREE/HREE= 1,35), lo mismo que para el suelo no cultivado (LREE/HREE= 1,30). Las anomalías de Ce\* para todos los suelos, respecto a la arenisca parental, son en promedio muy cercanos a 1 (0,96 a 1,02). Las anomalías de Eu\* son negativas para los suelos no cultivados (0,89) y cercanas a 1 para los suelos cultivados (0,95 y 1,02; Tabla A5.6 en Anexos).

Los coeficientes de transferencia de masa ( $T$ ) calculados en San Antonio (Tabla A5.7; Anexos), indican notorias diferencias entre los tres horizontes del perfil de suelo blanco (C-13), con un enriquecimiento de REE en los horizontes B y C y un patrón empobrecido en el horizonte A (Fig. 5.4B), con una mayor pérdida de Ce en el horizonte A ( $T_{Ti,Ce} = -0,34$ ) y una ganancia de Ce, en relación a las otras LREE (La y Pr), en el horizonte B ( $T_{Ti,Ce}=0,28$ ; Fig. 5.4A).

También se reconocen patrones contrastantes de los coeficientes de REE, en los suelos del cuartel Pendiente, entre los perfiles CP-10, en donde se tienen valores de  $T$  cercano a cero para las MREE y HREE (Nd a Lu) y leve enriquecimiento de LREE (La-Pr), y los perfiles de suelo CP-11 y CP-12, que muestran un patrón general, para todas las REE, de valores  $T$  positivos (0,26 a 0,47). Por otra parte, los suelos del cuartel Terraza (CT) muestra en promedio valores negativos de  $T$ , para todas las REE excepto las LREE (Nd-Pr). Se destaca, en general, mayores valores de  $T$  para las LREE, respecto a las REE medianas y pesadas (Nd a Lu; Fig. 5.4B).

#### **5.3.4.2 Geoquímica de REE biodisponibles en San Antonio**

La concentración de las REE en la fase biodisponible de los suelos de San Antonio, al igual que los índices Ce, Eu\*, LREE/HREE y MREE\*, se presentan en la tabla A5.8 (Anexos). Los patrones de REE biodisponibles en suelo respecto a la roca parental, muestran un empobrecimiento general de las LREE respecto a las HREE (Fig. 5.5A), con valores de LREE/HREE\* que varían entre 0,03 en los suelos intervenidos del cuartel Terraza a 0,26 en el suelo blanco (Tabla A5.8; Anexos).

Otro aspecto considerable es el empobrecimiento en REE biodisponibles en los suelos de arenisca intervenida ( $\bar{x}_{\Sigma REE} = 0,32$  ppm, en V15;  $\bar{x}_{\Sigma REE} = 0,39$  ppm, en V16) del cuartel CT, en relación a los suelos de arenisca del cuartel Pendiente ( $\bar{x}_{\Sigma REE} = 2,75$  ppm; en V15;  $\bar{x}_{\Sigma REE} = 2,93$  ppm, en V16). Mientras que el suelo blanco, muestra una concentración total de REE biodisponibles de 1,69 ppm en promedio, pero con un notorio patrón más enriquecido en el horizonte A, respecto al horizonte B (Fig. 5.5A); lo que también se observa en todos los suelos cultivados, en que el horizonte A presenta un patrón de REE enriquecido respecto al horizonte



B en todas las temporadas (Fig. 5.5A). En cuanto a las anomalías de  $Ce^*$ , mientras los suelos cultivados muestran fuertes anomalías positivas ( $\bar{x}_{Ce^*}$  variando entre 6,60 y 2,20), el suelo no cultivado conglomerádico tiene una leve anomalía negativa ( $\bar{x}_{Ce^*} = 0,77$ ).

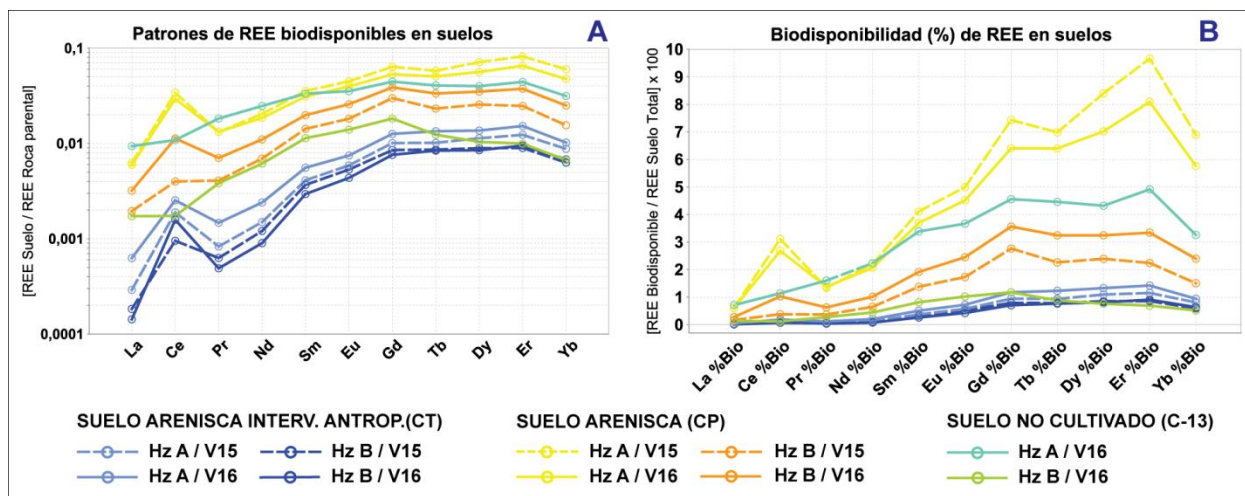


Figura 5.5 Patrón de REE en la fase biodisponible de los suelos de San Antonio, medidas en la temporadas Verano 2015 (V15) y Verano 2016 (V16). (A) Datos de REE biodisponibles en el suelo, normalizado a la roca parental. (B) Porcentaje de biodisponibilidad, respecto a la química total del suelo.

El cálculo del porcentaje de biodisponibilidad (%Bio) se presenta en la tabla A5.9 (Anexos) y sus patrones muestran que las REE medianas y pesadas (Nd-Lu) tienen una mayor biodisponibilidad, respecto a las LREE, en todos los suelos estudiados (Fig. 5.5B). Particularmente el suelo blanco, muestran %Bio mayores en el horizonte A (0,71 a 4,91%) que en el horizonte B (0,12 a 1,18%). Entre los suelos de ambos cuarteles también se reconocen notorias diferencias. Para los suelos de arenisca del cuartel Pendiente se tienen porcentajes que varían entre 0,60-9,66% en el horizonte A y 0,17-3,56% en el horizonte B, en los dos años de medición. Para los suelos del cuartel Terraza se calculan bajos valores (0,01-1,42%) con mayor porcentaje de biodisponibilidad de REE en los horizontes A. Se destaca además, el alto porcentaje de biodisponibilidad de Ce en el horizonte A de los suelos de arenisca, en ambas temporadas de medición ( $\bar{x}_{\%Bio(Ce)} = 3,11$  en V15;  $\bar{x}_{\%Bio(Ce)} = 2,68$  en V16).

Finalmente, se reconocen las mayores diferencias entre temporadas en el contenido de REE y su porcentaje de biodisponibilidad, para el cuartel Pendiente, con valores más contrastantes entre ambos horizontes para las mediciones del verano 2015, que para las del 2016 (Figs. 5.5), año en el cual no hubo riego de los viñedos.

### 5.3.5 GEOQUÍMICA DE REE EN SANTA CRUZ: RELACIÓN ROCA-SUELO

#### 5.3.5.1 Geoquímica de REE en suelo total en Santa Cruz

Los gráficos multielemento normalizados al Promedio global en suelos de Kabata-Pendias (2011), se realizan para comparar los patrones de REE entre la granodiorita parental en Santa Cruz, los suelos coluviales y los suelos desarrollados *insitu* sobre la granodiorita en el cuartel Pendiente (LP) y sobre depósitos fluvio-aluviales en el cuartel Isla (Fig. 5.6A). Los contenidos medios de REE y los índices asociados, calculados en los diferentes suelos, se presentan en la tabla A5.10 (Anexos).

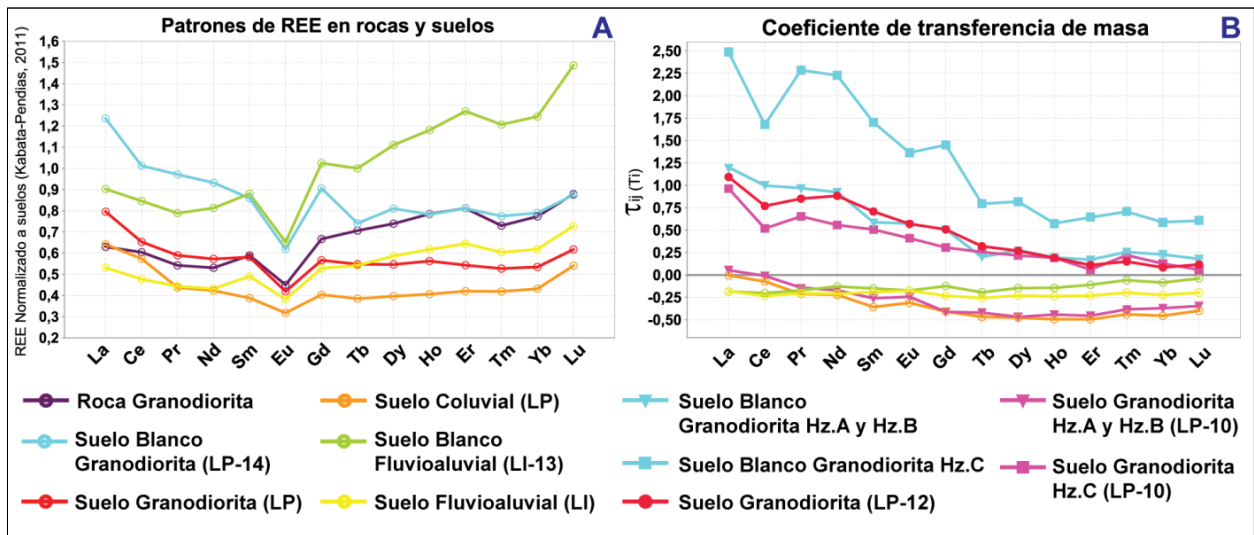


Figura 5.6. (A) Comparación de patrones de tierras raras (REE) entre roca parental Granodiorita y los suelos en viña de Santa Cruz, normalizado al Promedio global de suelos. (B) Coeficiente de transferencia de masa ( $T_{ij}$ ) para los suelos de Santa Cruz, respecto a la toba parental y a un elemento inmóvil (Ti).

Los contenidos de REE promedio de los suelos cultivados en Santa Cruz, tanto en el cuartel Pendiente ( $\bar{x}_{\Sigma REE} = 88,7$  y  $72,1$  ppm) como en el cuartel Isla ( $\bar{x}_{\Sigma REE} = 67$  ppm), muestran un patrón empobrecido en relación a la roca parental ( $\Sigma REE = 83$  ppm; Fig. 5.6A). Sin embargo, los suelos de ambos cuarteles poseen patrones de REE diferentes. Mientras que los suelos desarrollados sobre depósitos semiconsolidados en el cuartel Isla (línea amarilla) presentan un patrón afín a la roca (línea morada; Fig. 5.6B), en los suelos del cuartel Pendiente (líneas roja, naranja y celeste), se observa un paulatino empobrecimiento de MREE y HREE, respecto a la roca, evidenciado por un valor promedio de  $LREE/HREE^*$  de 1,66 para los suelos coluviales cultivados, 1,78 para los suelos granodioríticos cultivados y 1,97 para los suelos no cultivados (Fig. 5.6A). Esto podría explicarse por procesos pedogenéticos que afectan a estos suelos, desarrollados sobre una pendiente fuerte, sin embargo, debe testearse a nivel mineralógico para explicar con mayor detalle esta característica.

Por otra parte, cabe destacar que en promedio, los suelos blanco, tanto en el cuartel Pendiente ( $\Sigma\text{REE}= 129\text{-}154$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}}= 139$  ppm), como en el cuartel Isla ( $\Sigma\text{REE}= 119\text{-}122$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}}= 120$  ppm) están enriquecidos en REE, respecto a la roca y a los suelos cultivados. Además, para el contenido de REE en suelo total, tanto en suelos cultivados y no cultivados de ambos cuarteles, no se reconocen anomalías relevantes de  $\text{Ce}^*$  y  $\text{Eu}^*$ , respecto a la roca parental.

En cuanto a los coeficientes de transferencia de masa ( $\tau$ ) calculados en Santa Cruz (Tabla A5.11; Anexos), se reconoce un importante enriquecimiento ( $\tau_{\text{Ti,REE}} > 1$ ) de LREE y MREE (La-Gd) y alto enriquecimiento ( $\tau_{\text{Ti,REE}}$  entre 0,6 y 0,8) de HREE (Tb-Lu) en el horizonte C del suelo granodiorítico no cultivado, mientras que en los horizontes A y B de este suelo, los coeficientes de transferencia de masa tienen valores y patrones similares al suelo granodiorítico de la calicata LP-12, ubicada a menor altura (Fig. 4.48), y al horizonte C del suelo granodiorítico de la calicata LP-10, localizada en la cota más alta. Estos suelos también poseen un mayor enriquecimiento en LREE que va disminuyendo paulatinamente hasta valores cercanos a cero (inmovilidad) en las HREE (Fig. 5.6B). Por último, en el cuartel Pendiente los suelos coluviales y los horizontes A y B de la calicata LP-10, muestran valores  $\tau$  negativos, que indican un empobrecimiento en REE, pero manteniendo el patrón observado anteriormente, con coeficientes cercanos a cero para las LREE y con valores de  $\tau$  más negativos en las MREE y en las HREE (Fig. 5.6B).

Luego, los suelos cultivados y no cultivados del cuartel Isla, poseen coeficientes de transferencia de masa negativos con valores muy próximos a -0,25 para todas las REE en los suelos cultivados (línea amarilla) y con valores  $\tau$  de las HREE más cercanas a cero, o menos negativos, en los suelos no cultivados (línea verde, Fig. 5.6B).

### **5.3.5.2 Geoquímica de REE biodisponibles en Santa Cruz**

Los contenidos de REE en la fase biodisponible del suelo, medidos en Santa Cruz, muestran un patrón similar al observado en las viñas anteriores, con un empobrecimiento en LREE, respecto a la roca parental (Figs. 5.7A y 5.7B). Esto se mide en todos los suelos analizados y en los dos años de medición, con razones de  $\text{LREE}/\text{HREE}^*$  que varían desde 0,4 para los suelos fluvio-aluviales (cultivados y no cultivados) del cuartel LI, hasta 0,5 a 0,7 en los suelos del cuartel LP (granodioríticos y coluviales). Además, valores  $\text{MREE}^*$  entre 2,23 y 2,80 en todos los suelos respecto a la roca (Tabla A5.12; Anexos), indican altos valores de MREE respecto a LREE y HREE, en todos los suelos.

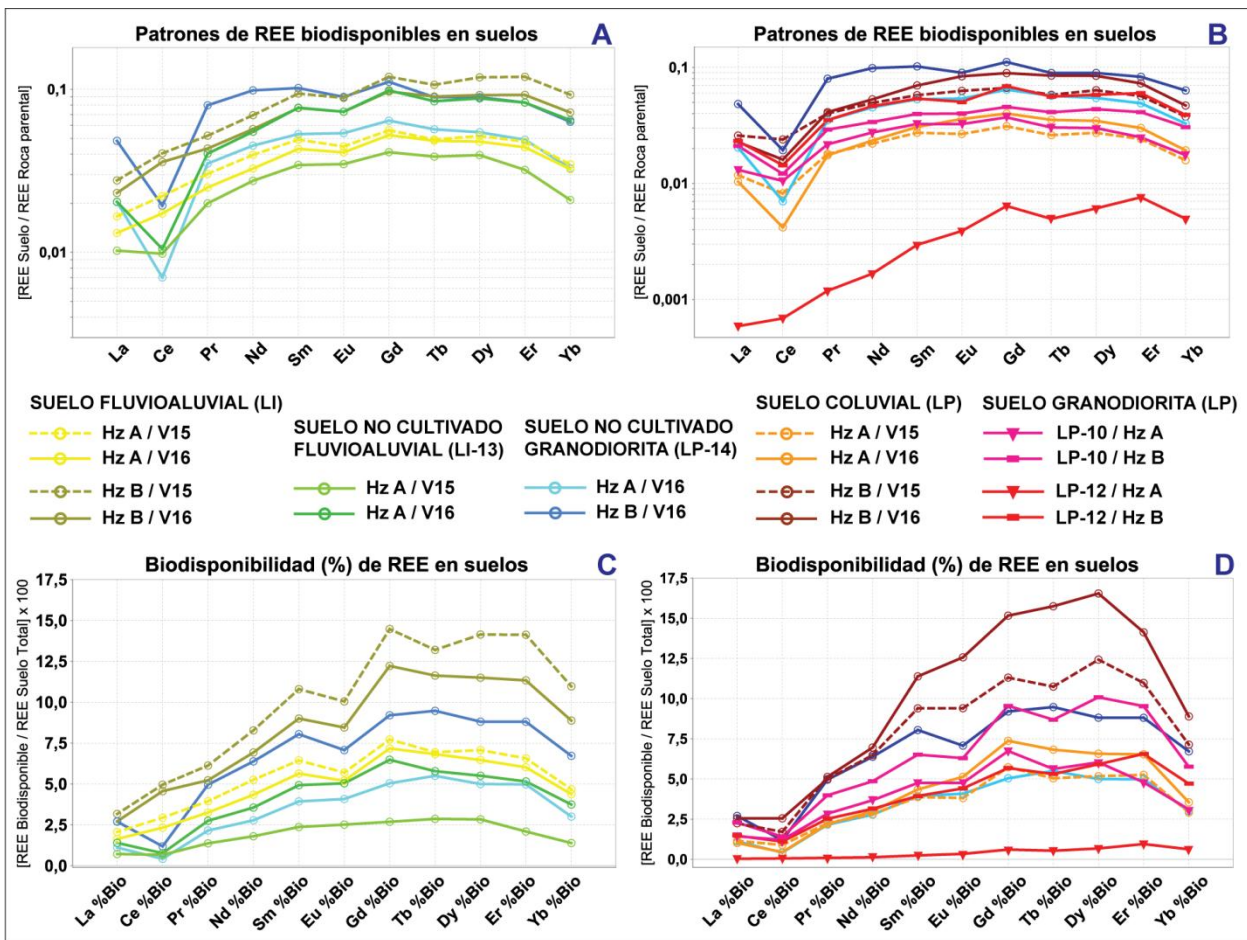


Figura 5.7 Patrón de REE en la fase biodisponible de los suelos de Santa Cruz, medidas en la temporadas Verano 2015 (V15) y Verano 2016 (V16). (A) Datos de REE biodisponibles en el suelo, normalizado a la roca parental, en el cuartel LI y (B) en el cuartel LP. (C) Porcentaje de biodisponibilidad, respecto a la química total del suelo, en el cuartel LI y (D) en el cuartel LP.

Anomalías negativas de Ce se reconocen para todos los suelos del cuartel Pendiente (LP), en ambas temporadas, con valores medios del índice  $Ce^*$  de 0,29 en el suelo no cultivado, hasta 0,77 medido en los suelos granodioríticos durante la temporada V16. La anomalía negativa de Ce, es menos pronunciada en las mediciones del V15 para los suelos coluviales ( $Ce^*_{V15}=0,71$  y  $Ce^*_{V16}=0,42$ ), en ambos horizontes (Fig. 5.7B); mientras que en el horizonte A de la calicata LP-12, no se reconoce anomalía de Ce y se destaca el patrón fuertemente empobrecido en REE respecto a los otros suelos de esta viña (Fig. 5.7B).

En el cuartel Isla (LI), los suelos fluvio-aluviales cultivados no muestran anomalía de Ce, en ambas temporadas ( $Ce^*_{V15}=1,00$  y  $Ce^*_{V16}=1,03$ ; Fig. 5.7A), por el contrario, el suelo blanco fluvio-aluvial sí presenta anomalía negativa de Ce ( $Ce^*=0,53$ ), respecto a la roca. En cuanto a las anomalía de Eu, todos los suelos presentan una leve anomalía negativa respecto a la roca, con valores de  $Eu^*$  promedio variando entre 0,84 a 0,93; a excepción de los suelos coluviales ( $Eu^*=0,96-1,03$ ) que no poseen esta anomalía (Tabla A5.12; Anexos).

En cuanto a los porcentajes de biodisponibilidad (%Bio) en los suelos de Santa Cruz (Tabla A5.13; Anexos), se reconocen mayores valores para las MREE y HREE (Figs. 5.7C y 5.7D) en todos los suelos, con %Bio que superan a 15% en los suelos coluviales durante el verano 2016 (Fig. 5.7D). En esta viña, se tienen además los mayores porcentajes de biodisponibilidad en los horizontes B en todos los suelos, tanto los cultivados como los no cultivados.

### 5.3.6 GEOQUÍMICA DE REE EN SAN JAVIER: RELACIÓN ROCA-SUELO

#### 5.3.6.1 Geoquímica de REE en suelo total en San Javier

En el área de San Javier se reconocen dos materiales diferentes dentro de un mismo cuartel, por una parte, se observaron suelos desarrollados directamente sobre una toba vítrea que se considera como roca parental y por otra parte, en el sector NE del cuartel, se encuentra un depósito con características sedimentarias sobre yaciendo a la toba, el que se interpreta como una secuencia sedimentaria aluvio-lacustre. Es por esta razón que al ser comparados con la toba, los suelos de San Javier, normalizados al Promedio global de suelos de Kabata-Pendias (2011), despliegan patrones de REE diferentes en los diagramas multielemento (Fig. 5.8A). Los valores de REE en suelos y los índices de REE calculados respecto a la roca parental, se presentan en la tabla A5.14 (Anexos).

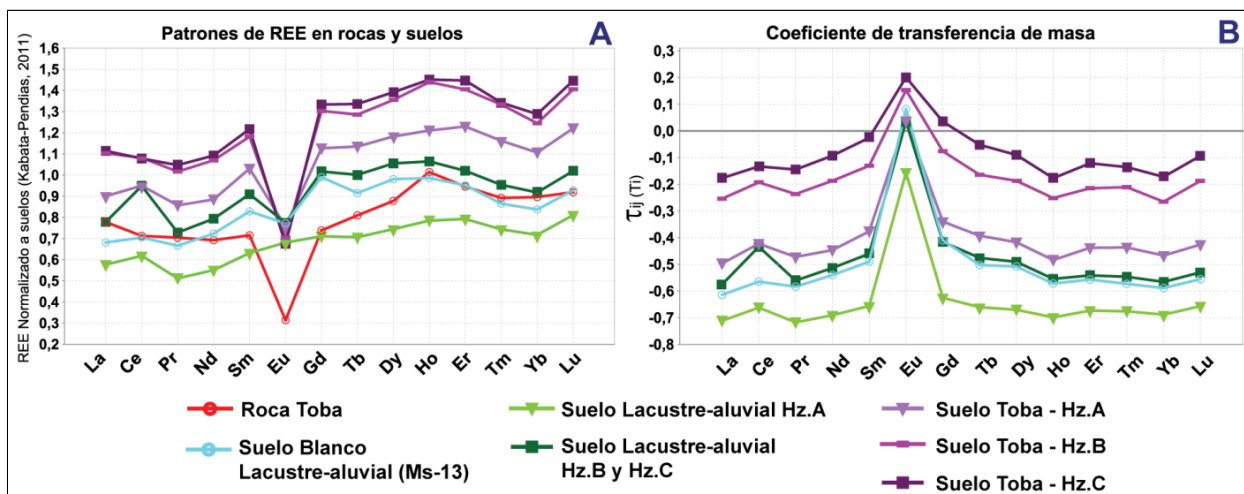


Figura 5.8 (A) Comparación de patrones de tierras raras (REE) promedio entre la roca parental Toba y los suelos en viña de San Javier, normalizado al promedio global de suelos. (B) Coeficiente de transferencia de masa ( $T$ ) para los suelos de San Javier, respecto a la toba parental y a un elemento inmóvil ( $T_i$ ).

Los suelos de toba cultivados ( $\Sigma\text{REE} = 118\text{-}183$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}} = 145$  ppm; líneas moradas) poseen un enriquecimiento en REE pero con un patrón, en promedio, muy similar al observado para la Toba ( $\Sigma\text{REE} = 100$  ppm), presentando en común, una fuerte anomalía negativa de Eu (Fig. 5.8A) respecto al promedio global en suelos. Para los suelos cultivados lacustres ( $\Sigma\text{REE} = 69\text{-}$



161 ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}} = 109$  ppm) se observa en promedio una concentración de REE similar al de la roca (Fig. 5.8B), pero con anomalías positivas para Eu y Ce ( $\bar{x}_{\text{Eu}^*} = 2,05$ ;  $\bar{x}_{\text{Ce}^*} = 1,26$ ), respecto a la roca. Por su parte el suelo blanco ( $\Sigma\text{REE} = 98\text{-}104$  ppm;  $\bar{x}_{\Sigma\text{REE}} = 100$  ppm) muestra un patrón de REE muy similar al del suelo cultivado sedimentario, diferenciándose únicamente por la ausencia de la anomalía positiva de Ce ( $\bar{x}_{\text{Ce}^*} = 1,09$ ), en relación a la roca. En ambos suelos cultivados (lacustre y tobáceo) se reconoce un empobrecimiento en el patrón de REE de los horizontes A, respecto a los horizontes B y C (Fig. 5.8A). Además se destaca, que a diferencia de lo que pasa en las tres viñas del norte, en San Javier el suelo no cultivado, no presenta un patrón de REE enriquecido, en relación a los suelos cultivados.

En relación a los coeficientes de transferencia de masa calculados para la viña de San Javier (Tabla A5.13), éstos muestran valores negativos para todos los suelos, con excepción de Eu, que presenta valores promedios positivos para todos los horizontes en los suelos desarrollados sobre la toba y, en menor medida, en los suelos sedimentarios no cultivados y en los horizontes B y C de los suelos lacustres cultivados (Fig. 5.8B). Este empobrecimiento de REE en los suelos, respecto a la roca y a Ti (como elemento inmóvil), puede deberse al bajo contenido de Ti que se presenta en la roca ( $\text{Ti} = 0,19\%$ ; Tabla A4.5) al compararlos con los suelos ( $\bar{x}_{\text{Ti}} = 0,43\%$ ; Tabla A4.43) de la viña en San Javier.

Por otra parte, el horizonte A de ambos suelos cultivados, posee valores de  $T$  más negativos que los horizontes B y C, esto indicaría un importante empobrecimiento en REE en el nivel superficie del suelo. Las anomalías positivas de Eu para los suelos lacustres cultivados y no cultivados ( $\bar{x}_{\text{Eu}^*} = 2,0$ ) y en menor medida para los suelos tobáceos, ( $\bar{x}_{\text{Eu}^*} = 1,39$ ) pueden verse reflejadas en los gráficos de coeficiente de transferencia de masa (Fig. 5.8B), esto se debe a las bajas concentraciones de Eu en la toba parental ( $\text{Eu} = 0,44$  ppm; Tabla A5.1) en comparación al Eu en los suelos de San Javier ( $\bar{x}_{\text{Eu}} = 1,03$  ppm; Tabla A5.14).

### **5.3.6.2 Geoquímica de REE biodisponibles en San Javier**

Los patrones de REE en la fase biodisponible del suelo, respecto a la roca, se muestran en la figura 5.9A, así como los valores promedios, para los distintos tipos de suelo se presentan en la tabla A5.14 (Anexos). A partir de estos datos, se reconoce que, al igual que en las viñas anteriores, todos los suelos estudiados experimentan un empobrecimiento de LREE al compararlos con la roca parental, evidenciado en bajos valores promedios de  $\text{LREE}/\text{HREE}^*$  y en altos valores promedio de  $\text{MREE}^*$ , tanto en los suelos de Toba ( $\text{LREE}/\text{HREE}^*$ :  $V15 = 0,31$  y  $V16 = 0,20$ ;  $\text{MREE}^*$ :  $V15 = 3,74$  y  $V16 = 3,97$ ), como en los suelos sedimentarios ( $\text{LREE}/\text{HREE}^*$ :

V15= 0,19 y V16= 0,18; MREE\*: V15= 5,71 y V16= 4,64) y también en el suelo blanco (LREE/HREE\* = 0,20; MREE\* = 3,55).

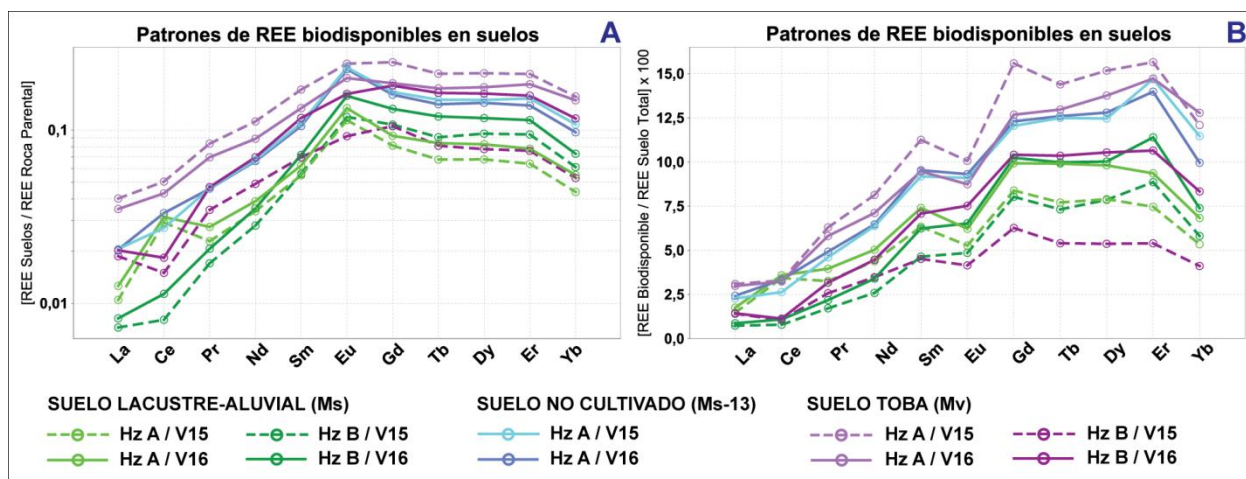


Figura 5.9 Patrón de REE en la fase biodisponible de los suelos de San Javier, medidas en la temporadas Verano 2015 (V15) y Verano 2016 (V16). (A) Datos de REE biodisponibles en el suelo, normalizado a la roca parental. (B) Porcentaje de biodisponibilidad, respecto a la química total del suelo.

Los suelos cultivados de ambos materiales parentales poseen alta variabilidad entre las mediciones del horizonte A y B, en ambas temporadas (Fig. 5.9A), con patrones de REE más deprimidos en los horizontes B y con diferencias en las anomalías de Ce que se reconocen en los diferentes tipos de suelo y entre los horizontes A y B. Específicamente, una anomalía positiva de Ce se reconoce en el horizonte A de los suelos lacustres, mientras que una anomalía negativa de Ce se presenta en el horizonte B de los suelos tobáceos (Fig. 5.9A). El suelo blanco, por su parte, muestra de manera consistente una nula anomalía de Ce\* respecto a la roca ( $\bar{x}_{Ce^*} = 0,98$ ). Finalmente los suelos sedimentarios, cultivados y no cultivados, tienen una alta anomalía positiva de Eu respecto a la roca, variando el índice Eu\* entre 1,66 y 1,71; mientras que en los suelos de Toba la anomalía positiva es, en promedio, más leve ( $\bar{x}_{Eu^*} = 1,17$  y 1,30; Tabla A5.14 en Anexos).

Los porcentajes de biodisponibilidad (%Bio) calculados para los suelos de San Javier (Tabla A5.15; Anexos), aumentan considerablemente desde las MREE a las HREE (Nd a Yb; Fig. 5.9B); con porcentajes que varían desde 0,7 a 11,4% en los suelos lacustres cultivados de ambas temporadas y, en general, con mayores valores (entre 2,9 a 15,1%) para los suelos tobáceos.

En los suelos cultivados se reconocen diferencias entre los horizontes, en general, se tienen mayores %Bio en los horizontes A, respecto a los horizontes B, para ambos suelos. Sin embargo, para el caso de los suelos tobáceos, el porcentaje de biodisponibilidad es notoriamente más contrastante para las mediciones de la temporada V15, con los valores más

bajos de MREE y HREE (Sm e Yb), respecto al resto de suelos, medidos en el horizonte A durante el verano 2015 (Fig. 5.9B). Mientras que para los suelos lacustres, los %Bio de las LREE (La-Nd) son mayores en los horizontes A (medidos en ambas temporadas), no obstante, para las MREE y HREE (Sm-Yb) los valores de %Bio son superiores en las mediciones realizadas en la temporada V16, respecto a lo medido en la temporada V15, con pocas diferencias entre horizontes.

Finalmente para el suelo blanco de origen lacustre, se observan nulas diferencias entre horizontes y con valores del %Bio (2,3 a 14,7%) mayores a los suelos lacustres cultivados (Fig. 5.9B).

### 5.3.7 COMPARACIONES DE GEOQUÍMICA DE REE ENTRE VIÑAS

En la tabla 5.1, se presentan de forma resumida y comparativa, los principales resultados obtenidos en las composiciones, índices y patrones de REE medidas en la química total de los suelos de las cuatro viñas en estudio. Además, el mismo ejercicio comparativo entre viñas se realiza para los patrones de REE en la fase biodisponible y en los porcentajes de biodisponibilidad de los suelos (Tabla 5.2).

## 5.4 DISCUSIONES

### 5.4.1 REE COMO ELEMENTOS TRAZADORES DE LA LITOLOGÍA, METEORIZACIÓN Y PROCESOS PEDOGENÉTICOS

#### 5.4.1.1 Patrones de REE de rocas y suelos

Patrones similares entre los suelos y su material parental, registradas en todas las viñas, indican que las REE pueden ser usadas para trazar la fuente litológica de los suelos, al menos en suelos menos evolucionados, ya que la edad y la evolución de los suelos podrían modificar el comportamiento de las REE (Tyler 2004). Sin embargo, en concordancia con los resultados de esta tesis, investigaciones en diferentes suelos de Alemania (Mihajlovic *et al.* 2019) y Cuba (Rodríguez *et al.* 2018) indican que el contenido de REE de las rocas parentales controlan la composición de REE de los suelos.

Específicamente, los resultados muestran que materiales parentales de litología similar, como los granitoides de Casablanca y Santa Cruz, tienen patrones de REE prácticamente iguales, aunque estén ubicados en valles distantes y con mesoclimas diferentes (Montes *et al.* 2012). Los suelos graníticos de ambas viñas presentan patrones afines a la roca, excepto para los suelos desarrollados directamente sobre la granodiorita y en una fuerte pendiente en la viña de

Santa Cruz. Además un patrón diferencial se observa en los suelos de ambas viñas, con un enriquecimiento relativo de REE en Casablanca y un empobrecimiento en Santa Cruz, respecto a los granitoides parentales (Castillo *et al.* 2015b).

Tabla 5.1. Resumen comparativo de los resultados obtenidos a partir de la geoquímica de REE en la química de suelo total, para las cuatro viñas en estudio.

Valores medios	CASABLANCA	SAN ANTONIO	SANTA CRUZ	SAN JAVIER
<b>Patrón de REE</b>	- Suelos tonalíticos (todos) = roca - Suelos tonalíticos ≠ suelos y roca Aplita. - Suelos aplíticos ≈ roca Aplita	- Suelos (todos) = rocas	- Suelos LI = roca - Suelos LP ≠ rocas y suelos LI - Suelos cultivados = suelos No cultivados de c/cuartel	- Suelos Mv = roca. - Suelos Ms ≈ roca y suelos Mv - Suelos Ms cultivados = suelos No cultivado
<b>ΣREE</b>	- Suelo No cultivado > Suelos cultivados - Suelos (todos) > Roca - Suelos VC > Suelos VP - Suelos tonalíticos > Suelos aplíticos	- Suelo No cultivado > Suelos cultivados - Arenisca parental CP > Arenisca parental CT - Suelos > Roca - Suelos CP ≈ Suelos CT	- Suelos No cultivados > Suelos cultivados - Suelos LI < Roca - Suelos LP ≤ Roca	- Suelos Mv > Roca - Suelos Ms ≈ Roca - Suelos Mv > Suelos Ms - Suelo No cultivado ≤ suelos cultivados
<b>HREE MREE LREE</b>	- Suelos tonalíticos: LREE < HREE - Suelos aplíticos: LREE > HREE - Suelos (todos): MREE* > 1	- Suelo No cultivado y suelos CT: LREE > HREE - Suelo CP: LREE ≈ HREE - Suelo No cultivado y suelo CP: MREE* ≈ 1 - Suelo CT: MREE* < 1	- Suelos LI: LREE ≤ HREE - Suelos LP: LREE > HREE - Suelos LI (todos) y No cultivado LP: MREE* ≈ 1 - Suelos cultivados LP: MREE* < 1	- LREE < HREE en suelos (todos) - MREE* > 1 en suelos (todos)
<b>Ce*</b>	- Sin anomalías	- Sin anomalías	- Sin anomalías	- Suelo Ms cult.: (++) - Suelo No cultivado Ms y suelos Mv (+)
<b>Eu*</b>	- Suelo No cultivado y suelo de tonalita (-) - Suelo aplítico (+)	- Suelos cultivados (CT y CP) sin anomalías - Suelo No cultivado (-)	- Suelo coluvial LP (+) - Otros suelos sin anomalía	- Suelos (todos) (+)
<b>T<sub>Ti, REE</sub></b>	- Suelos tonalíticos: T > 0 - Suelo No cultivado y suelo de tonalita: T ≈ 0 - T > para suelos de depósitos (coluvial VC, aluvial y remoción VP). - Suelo aplítico: T < 0	- Suelos (todos): T (LREE) > T (HREE) - Suelo No cultivado: T < 0 en Hz A T > 0 en Hz B y Hz C - Suelos CT: T < 0 (Sm-Lu) - Perfil CP-10: T <sub>ij</sub> ≈ 1 - Perfiles CP-11 y CP-12: T > 0	- Suelos LI: T < 0 - Suelos LP: T (LREE) > T (HREE) - Suelo No cultivado LP: T >> 0 en Hz C. T > 0 Hz A y B - Perfil LP-12 y Hz C (LP-10): T > 0 - Suelo coluvial LP y Hz A y B (LP-10): T < 0	- Suelos (todos) T < 0 - Hz A de suelos cultivados T << 0
<b>T<sub>Ti, Ce/Eu</sub></b>	- Suelo No cultivado y suelo de tonalita: T (Ce y Eu) ≈ 1 - Suelo aplítico: T (Eu) > T de otras REEs	- Suelo No cultivado: Hz A: T(Ce) << 0 Hz B: T(Ce) >> 0 Hz B: T(Eu) ≈ 1 Hz C: T(Eu) < 0	- Suelo No cultivado LP: Hz C: T(Ce) << T(La y Pr)	- Suelos (todos): T (Eu) > 0

Tabla 5.2. Resumen comparativo de los resultados obtenidos a partir de las REE medidas en la fase biodisponible del suelo, para las cuatro viñas en estudio.

Valores medios	CASABLANCA	SAN ANTONIO	SANTA CRUZ	SAN JAVIER
<b>Patrón de REE</b>	- Suelos (todos): LREE empobrecimiento - Suelos tonalíticos ≠ suelos aplíticos	- Suelos (todos): LREE empobrecimiento - Suelos cultivados ≠ suelo No cultivado	- Suelos (todos): LREE empobrecimiento. - Suelos (todos) ≈ Hz B Suelo No cultivado LP ≠ Hz A Perfil LP-12	- Suelos (todos): LREE empobrecimiento. - Suelos Mv ≠ Suelos Ms = Suelo No cultivado Ms
<b>ΣREE</b>	- Suelos cultivados: Hz A > Hz B - Suelo No cultivado: Hz A ≈ Hz B - Suelo Aplita > No cultivado > Aluvial > Coluvial > Tonalita > Rem.Masa	- Suelos (todos): Hz A > Hz B - Suelos CP > Suelo No cultivado > Suelos CT	- Suelos (todos): Hz A < Hz B - Suelos LI > No cultivado LP > No cultivado LI > Coluvial LP > Granodiorita LP	- Suelos Mv: Hz A > Hz B - Suelo No cultivado Ms: Hz A ≈ Hz B - Suelos Ms: LREE Hz A > LREE Hz B HREE Hz A < HREE Hz B - Suelos Mv > Suelo No cultivado Ms > Suelos Ms
<b>HREE MREE LREE</b>	- Suelos (todos): LREE < HREE MREE* >> 1	- Suelos cultivados CT y CP: LREE << HREE MREE* >> 1 - Suelos No cultivado: LREE < HREE MREE* > 1	- Suelos (todos): LREE < HREE MREE* > 1	- Suelos (todos): LREE < HREE MREE* >> 1
<b>Ce*</b>	- Suelo aluvial: (++) - Suelos (otros): (+) - Suelo coluvial V15: (-)	- Suelos cultivados CT y CP: (++) - Suelo No cultivado: (-)	- Suelos cultivados LI: Sin anomalías - Suelos otros: (-)	- Hz A Suelos Ms: (+) - Suelos Mv: (-) - Suelo No cultivado Ms: Sin anomalía
<b>Eu*</b>	- Suelo aplita: (+) - Suelos tonalíticos (todos): (-)	- Suelos (todos): Eu* ≈ 1 Sin anomalías	- Suelo coluvial LP: Sin anomalías - Suelos otros: leve (-)	- Suelos (todos): (+)
<b>%Bio</b>	- Suelo No cultivado: 0,6 - 3,0% - Suelos tonalíticos: 0,15 - 5,5% - Suelo aplita: 0,3 - 6,8%	- Suelo No cultivado: Hz A: 0,7 - 4,9% Hz B: 0,1 - 1,1% - Suelos CT: 0,01 - 1,4% - Suelos CP: Hz A: 0,6 - 9,7% Hz B: 0,17 - 8,1%	- Suelo No cultivado LI: Hz A: 0,7 - 2,9% Hz B: 0,8 - 6,5% - Suelos LI: Hz A: 1,6 - 7,7% Hz B: 2,7 - 14,5% - Suelos No cultivado LP y perfil LP-10: Hz A: 0,4 - 6,7% Hz B: 0,2 - 10,1% - Suelo Coluvial LP: Hz A: 1,45 - 7,4% Hz B: 1,7 - 16,5% - Perfil LP-12: Hz A: 0,04 - 0,95% Hz B: 1,1 - 6,6%	- Suelo No cultivado Ms: 2,3 - 14,7% - Suelos Ms: V15: 0,7 - 8,8% V16: 0,9 - 11,4% - Suelos Mv: Hz A: 2,9 - 15,1% Hz B: 1,1 - 10,6%



Por otra parte, materiales parentales de otras litologías (aplita en Casablanca, toba vítrea en San Javier y secuencia sedimentaria marina en San Antonio), poseen patrones de REE concordantes con sus suelos (Castillo-Lagos *et al.* 2016), observando un notable enriquecimiento de REE respecto a la roca, en los suelos de San Javier. Para los suelos de San Antonio se presenta un patrón muy similar entre rocas y suelos, con enriquecimiento leve en REE livianas (LREE: La a Nd) en los suelos más intervenidos, respecto de la roca parental, y en Casablanca los suelos aplíticos están enriquecidos respecto a la roca y con un patrón levemente diferente.

Estas variaciones reconocidas entre los patrones de las rocas parentales y algunos suelos, el enriquecimiento de REE en los suelos de San Javier y en el suelo aplítico de Casablanca, así como el patrón diferencial de enriquecimiento y empobrecimiento en los suelos graníticos de Casablanca y Santa Cruz, respectivamente, pueden ser explicados por procesos pedogenéticos influenciados por la topografía y el mesoclima específico de cada cuartel y viña en estudio (Castillo-Lagos *et al.* 2016), o bien por diferencias en la tasa de meteorización de los minerales que contienen REE en la roca y suelos.

Particularmente en Santa Cruz, los suelos del cuartel Pendiente poseen patrones de REE diferentes a los suelos del cuartel Isla y a la granodiorita parental, con LREE mayores a MREE y HREE y con un enriquecimiento en LREE dado por altos valores del coeficiente de transferencia de masa ( $T$ ), principalmente en el horizonte C del suelo no cultivado. Este hecho puede indicar, por una parte, la influencia de la fuerte pendiente en que se ubican estos suelos, en la disolución preferencial de MREE y HREE por sobre las LREE o bien en un mayor grado de retención de estas últimas en fases estables del suelo (e.g. Mihajlovic *et al.* 2019). Además, el alto enriquecimiento de todas las REE, pero particularmente de las LREE en el horizonte C del suelo no cultivado, vislumbra el origen geogénico de las REE y a la vez la influencia del uso agrícola del suelo en el aumento de la movilidad de las REE y su empobrecimiento en el perfil de suelo.

#### **5.4.1.2 Efecto de la mineralogía en suelos derivados de granitoides**

Estudios mineralógicos bajo microscopio electrónico, presentados en Castillo *et al.* (2017b), proponen que una explicación del enriquecimiento en el patrón de REE en Casablanca y del empobrecimiento en Santa Cruz, respecto al mismo material parental, podría estar dada por los minerales que contienen las REE, los cuales fueron separados y reconocidos desde muestras del horizonte B de los suelos de ambas viñas. En Casablanca predominan los silicatos y óxidos de Zr, Ti y Th tales como torita, alanita, circón, esfeno y rutilo, por sobre los fosfatos (Fig.

5.10A); mientras que en Santa Cruz prevalecen fosfatos como monacita y fosfato de Th, con menor ocurrencia de silicatos (Fig. 5.10B). La mayor resistencia a la meteorización de los silicatos y óxidos (Nickel 1973; Laveuf & Cornu 2009), puede inducir a un aumento relativo de las REE, dado por la concentración de minerales residuales en los suelos de Casablanca, mientras que en Santa Cruz, los fosfatos, más susceptibles a la meteorización química (Braun *et al.* 1993), llevarán a la lixiviación de las REE del perfil del suelo.

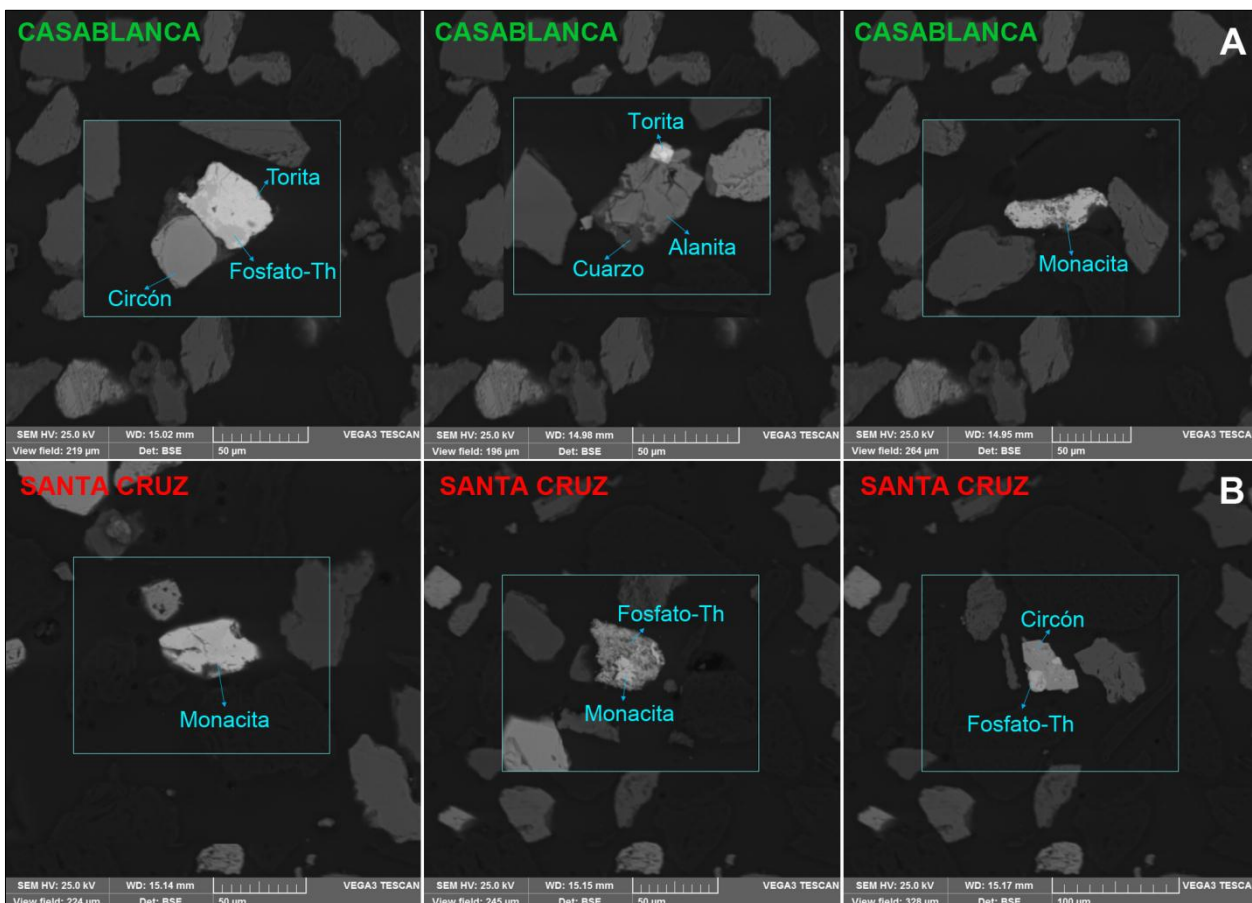


Figura 5.10. Imágenes de electrones retrodispersados (BSE) con granos de minerales concentrados. En colores más claros se destacan minerales que presentan REE. (A) Separados minerales de la muestra VP-2B del cuartel piedemonte de Casablanca y (B) Separados minerales de la muestra LP-10B del cuartel Pendiente de Santa Cruz. Imágenes obtenidas en el Laboratorio Geoatacama (La Serena).

#### 5.4.1.3 Biodisponibilidad de LREE

En todos los suelos estudiados, de las cuatro viñas, se observa que la fase biodisponible presenta una razón LREE/HREE menor a 1 y un coeficiente MREE\* mayor a 1, asimismo los porcentajes de biodisponibilidad muestran los menores valores para las LREE. Estos resultados son coherentes con la inmovilización y fraccionamiento de las tierras raras livianas (La a Nd) en fases estables de los suelos, tales como arcillas y fases amorfas de hierro oxidado (Compton *et*

al. 2003) o en precipitados de fosfatos de aluminio y fases de baja cristalinidad ricos en LREE (Braun *et al.* 1993).

Por otra parte, Laveuf & Cornu (2009) indican que para un mismo estado de valencia trivalente, las HREE tienen una mayor capacidad de ser adsorbidas que las LREE (Goldschmidt 1958), lo cual implica que las HREE tenderán a mantenerse en un estado biodisponible.

#### **5.4.1.3 Anomalías de Ce**

El grupo de elementos de las tierras raras tienen un estado de oxidación +3 (Laveuf & Cornu 2009), lo que explica en gran medida, la similitud de su comportamiento químico (Tyler 2004), sin embargo, en la superficie terrestre, tanto Eu como Ce, se presentan en dos estados de oxidación (Henderson 1984), los cuales corresponden a +3 y +4 para Ce y +3 y +2 para Eu. Esta propiedad de ambos elementos, les otorga cualidades sensitivas a procesos redox bajo condiciones oxidantes y reductoras (Ma *et al.* 2011).

La química total de los suelos en estudio no muestran anomalías de Ce\*, excepto para los suelos de San Javier, los cuales registran anomalías positivas, con un valor de Ce\* mayor en los suelos de origen lacustre-aluvial (1,26) y particularmente en los horizontes B y C de estos suelos, en los que se reconoce la presencia de un material coloidal, con ocurrencia de nódulos de Fe-Mn, los que podrían estar controlando la precipitación de Ce<sup>+4</sup> en un ambiente oxidante, tal como se describe en Ma *et al.* (2011). Asimismo, Laveuf & Cornu (2009) indican que las anomalías positivas de Ce son útiles para trazar procesos redox, en base a que el Ce se concentra como cerianita (CeO<sub>2</sub>) en óxidos de Fe-Mn. Por otra parte, la comparación en la tasa de translocación de isótopos de <sup>141</sup>Ce y <sup>147</sup>Nd, bajo simulación de lluvias de 600 a 1500 mm, muestra que Ce tiene mayor capacidad de movilizarse hacia niveles inferiores (Hu *et al.* 2006), esto podría explicar la anomalía más pronunciada en los horizontes B y C. Por el contrario, la ausencia de anomalías en la fase total del suelo en las otras viñas (Casablanca, San Antonio y Santa Cruz) indicaría que respecto a la roca parental, no hay una retención preferencial de Ce en las fases estables del suelo.

En la fase biodisponible de los suelos estudiados, las anomalías de Ce\* presentan valores contrastantes desde negativas, positivas a ausencia de anomalías, en los suelos de diferentes cuarteles y en los dos horizontes analizados. Esta especificidad en las anomalías de Ce\*, está dada por la formación o disolución de fases minerales en el suelo, según las condiciones pedogenéticas y las reacciones de óxido-reducción particulares que están ocurriendo en cada horizonte (Nakada *et al.* 2013). Sin embargo, es importante considerar que parámetros más específicos como la abundancia, la razón de los isótopos estables y la especiación química de

Ce (Nakada *et al.* 2013), influirán en las anomalías de este elemento en la fase biodisponible del suelo.

Además el Ce tiene una alta capacidad de formar complejos con ácidos húmicos (Geng *et al.* 1998). Pourret *et al.* (2008) reconocieron una preferencial adsorción de  $Ce^{+4}$  en ácidos húmicos mientras que Janots *et al.* (2015) determinaron una mayor movilidad de Ce (tanto  $Ce^{+4}$  como  $Ce^{+3}$ ) en fluidos acuosos, debido a la formación de complejos con moléculas orgánicas. Estas condiciones, serían responsables de anomalías positivas en la fase biodisponible del suelo (si ocurre adsorción en ácidos húmicos), pero también de anomalías negativas (Mihajlovic *et al.* 2019), en caso de lixiviación de Ce del perfil de suelo.

A raíz de la discusión anterior, se concluye que si bien las anomalías de Ce entregan una señal que podría definir ciertos procesos pedogenéticos que están ocurriendo en el perfil de suelo, se estima que no es posible generalizar y es necesario revisar cada perfil de suelo, respecto a la mineralogía presente, así como también realizar análisis de extracción secuencial, a modo de determinar las fases minerales y/o orgánicas, en las cuales podría estar retenido el Ce.

#### 5.4.2 REE COMO ELEMENTOS TRAZADORES DE INTERVENCIÓN ANTRÓPICA

La comparación de los contenidos de REE entre los suelos cultivados y los no cultivados, muestra que ambos presentan un patrón similar en todas las viñas en estudio, sin embargo, la suma total de REE ( $\Sigma REE$ ) en los suelos no cultivados es considerablemente mayor en tres de las cuatro viñas estudiadas: Casablanca, San Antonio y Santa Cruz. Para el caso de San Javier, se observa que el sector seleccionado como calicata blanco es una zona que previamente había sido cultivada (Fig. 5.11), por lo tanto, el contenido de REE, podría mantener un patrón asociado al de suelos cultivados más que al patrón de áreas no cultivadas.

Por otra parte, cabe destacar que el coeficiente de transferencia de masa de los suelos no cultivados es, en general, similar al de los suelos cultivados, excepto para el caso del suelo blanco (LP-14) del cuartel Pendiente de la viña de Santa Cruz. Esto podría explicarse porque en los suelos no cultivados se registraron contenidos de titanio mayores a los medidos en las rocas parentales (lo cual no ocurre para el caso del suelo LP-14) lo que genera, una distorsión en la lógica que hay detrás del uso del coeficiente de transferencia de masa, ya que se espera que ambos medios (roca y suelo) tengan contenidos similares del elemento inmóvil, en este caso de Ti. Por lo tanto, se asume que para el caso de los suelos no cultivados el coeficiente  $T$  no es un parámetro válido.

Para explicar el mayor contenido de REE en los suelos no cultivados se plantean tres hipótesis: a) Incremento en las tasas de meteorización de minerales menos resistentes que contienen REE (e.g. fosfatos y allanita) en los suelos cultivados, debido al manejo agrícola, el cual incluye prácticas como riego artificial y uso de agroquímicos, que modifican las condiciones de pH-Eh naturales. b) Asumiendo que las REE estén siendo principalmente retenidas en complejos órgano-metálicos (e.g. Pourret *et al.* 2008) los cuales serían estables en condiciones naturales, una intervención en el cambio de uso del suelo, podría generar una degradación de estos complejos y, una consecuente, lixiviación de las REE que no sean retenidas por otras fases como arcillas u óxidos de Fe-Mn. c) Fraccionamiento preferencial de REE por las plantas de *Vitis vinífera L.*

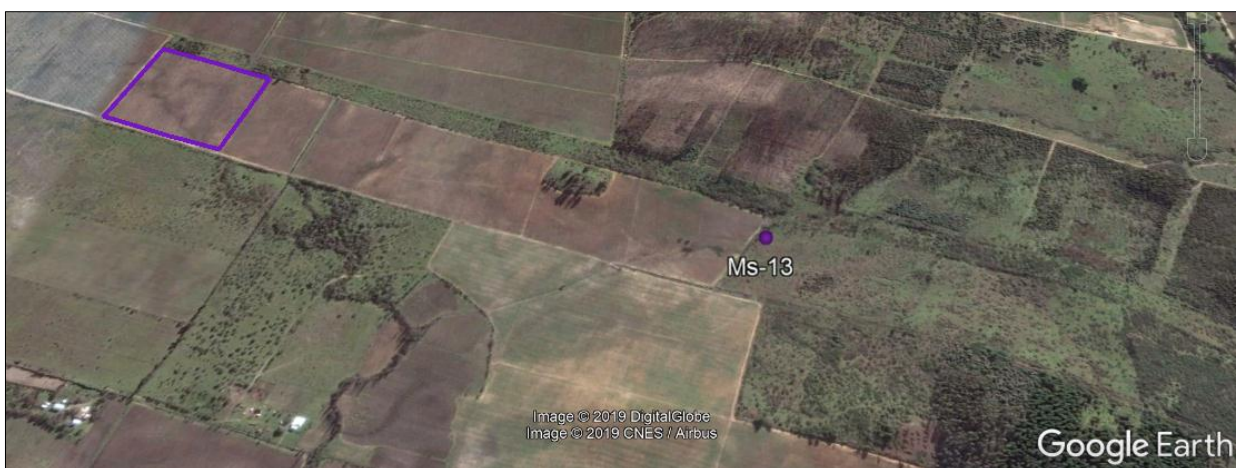


Figura 5.11. Imagen satelital de viña de San Javier, en que se muestra que la calicata no cultivada se ubica en un sector previamente cultivado. En cuadrado morado cuartel en estudio.

El aumento en la tasa de meteorización debido al uso agrícola del suelo ha sido pobremente reportado en la literatura. Paces (1991) determinó que las prácticas agrícolas en suelos de la antigua Checoslovaquia incrementan la tasa de meteorización hasta tres veces, según el balance de masa de once elementos durante un monitoreo de al menos 13 años, observando una disminución del contenido de nutrientes en el suelo. Aumento en la tasa de meteorización en suelos agrícolas, fue también determinado por el sílice disuelto en microcuencas con diferentes uso de suelo en la cuenca del río Ohio-Tennessee en Estados Unidos (Fortner *et al.* 2012) y en cuencas de Francia (Aquilina *et al.* 2017), en donde también se reconoce un incremento en el contenido de cationes exportado hacia los ríos (Aquilina *et al.* 2012). El uso de REE en la meteorización química inducida por la agricultura, puede aportar nuevas evidencias en uno de los procesos de larga escala más relevantes en la regulación de los niveles de CO<sub>2</sub> atmosférico (e.g. Sun *et al.* 2010; Douglas 2006) lo que tiene influencia en la temperatura global (e.g. Berner & Berner 2012; Walker *et al.* 1981).



La segunda hipótesis que podría ser testeada refiere a la brusca pérdida de materia orgánica (MO) durante la primera instalación de un cultivo, lo cual ha sido ampliamente reportado desde trabajos que datan de los años 30 (Stevenson & Cole 1999). Por otra parte, la asociación de las REE con la MO (e.g. Mihajlovic *et al.* 2019; Geng *et al.* 1998) y las tasas más cortas en los flujos de interacción de los procesos biológicos y biogeoquímicos, que pueden ocurrir desde pocos años, hasta en meses e incluso horas (Voroney 2007), lleva a suponer que esta hipótesis podría ser una de las más probables, para explicar la notoria pérdida de REE en los suelos cultivados. Si bien el porcentaje MO en los suelos cultivados y no cultivados en las áreas de estudio son similares, se requiere analizar más a fondo el tipo de MO presente en ambos suelos y el tipo de complejos órgano-metálicos que se han formado.

La tercera hipótesis planteada hace referencia al consumo de REE preferencial por las plantas de vid, respecto a la vegetación establecida en las zonas no cultivadas. Si bien Laveuf & Cornu (2009) indican que las plantas sólo pueden fraccionar menores porciones de REE del suelo, cultivos de tipo permanente como los viñedos, podrían generar un mayor consumo de estos elementos. En general, se ha reportado que las raíces acumulan un mayor contenido de REE respecto a los tejidos aéreos de plantas (e.g. Zaharezcu *et al.* 2017; Brioschi *et al.* 2013; Tyler & Olsson 2001), esto también fue reconocido en plantas de *Vitis vinífera L.* (Censi *et al.* 2014). Mientras que estudios en tejidos aéreos de distintas variedades de vides indican que las REE se concentran principalmente en las hojas (Punturo *et al.* 2018; D'Antone *et al.* 2017). Este fraccionamiento diferencial podría generar una acumulación de REE en el horizonte superficial del suelo, al ser las vides cultivos de hojas caducas, sin embargo, esto no es evidente en las áreas de estudio. Por lo tanto, estudio enfocados en ambos tipos de vegetación, podrían aportar evidencias para responder específicamente a esta hipótesis.

# CAPITULO 6. RELACIÓN BIOGEOQUÍMICA DEL SISTEMA ROCA-SUELO-AGUA-PLANTA: NUTRIENTES MINERALES ESENCIALES

## 6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la publicación científica “*Biogeochemistry of plant essential mineral nutrients across rock, soil, water and fruits in vineyards of Central Chile*”, que tiene como objetivo trazar la relación de los nutrientes minerales esenciales: P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu, además de Na que corresponde a un elemento beneficioso, entre los sistemas roca parental, suelo, aguas y frutos. Los datos son analizados desde una escala local, a nivel de viñedos, y a nivel regional, por comparación entre las cuatro zonas en estudio.

En base a las preguntas científicas planteadas, este capítulo se enfoca en responder a la pregunta ¿Es trazable la química de los suelos, rocas y/o aguas en la química de la planta? Y de manera secundaria a la pregunta ¿Cuál es la influencia relativa del material parental y de la actividad antrópica en las condiciones actuales de equilibrio del “sistema suelo” en estudio?

## 6.2 PUBLICACIÓN CIENTÍFICA

### **Biogeochemistry of plant essential mineral nutrients across rock, soil, water and fruits in vineyards of Central Chile**

Pamela Castillo<sup>1</sup>, Ignacio Serra<sup>2</sup>, Brian Townley<sup>1</sup>, Felipe Aburto<sup>3</sup>, Sofía López<sup>1</sup>, Joseline Tapia<sup>4</sup>, Muriel Contreras<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Departamento de Geología, Facultad Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

<sup>2</sup> Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Av. Vicente Méndez 595, Chillán, Chile.

<sup>3</sup> Departamento de Silvicultura, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile.

<sup>4</sup> Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás, Santiago, Chile.

<sup>5</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción, Edmundo Larenas 129, Concepción, Chile.

## **ABSTRACT**

Essential mineral nutrients are key elements for the development and production of grapevines. Under natural conditions most nutrients have a lithogenic origin, however, in agroecosystems their contents and distribution can be greatly altered by anthropogenic additions. To assess the origin and contribution of lithogenic and anthropogenic nutrient sources, we studied the rock-soil-water-fruit interphase in four vineyards characterized by contrasting geological, geomorphological, and mesoclimatic conditions and magnitude of anthropogenic influence.

Detailed mapping and soil characterization were carried out at each vineyard. Additionally, parent rock, soil, berries, rain, irrigation water and groundwater were sampled and the distribution and behavior of P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, and Na were studied.

Geochemistry of soils was concordant with its lithological origin. However, Zn and Cu were dominantly anthropogenic due to atmospheric deposition and the use of agrochemicals. This was evidenced by their greater bioavailability in topsoil and by the chemistry of irrigation and rainwater. In the berries, K-S and Ca-Mg-P were respectively concentrated in Carmenere and Pinot Noir cultivars, while Fe, Mn, Zn and Cu had a particular distribution at each vineyard, reflecting its unique interaction between environment, lithology, soil properties and viticultural practices. Factor Analysis displayed good correlation between soils and berries in K and  $\pm$  Na-Fe-Cu-Mg contents, which implies that soil composition was reflected in the composition of the berries.

Since geochemical, geological and environmental influences on the chemistry of berries were recognized, it is proposed that interdisciplinary agricultural-geological studies can be undertaken to improve strategies of viticultural management.

### **KEYWORDS:**

Essential mineral nutrient; biogeochemistry; parent material; anthropogenic source; viticulture.

## **1. INTRODUCTION**

There are at least seventeen recognized essential mineral nutrients (EMNs) for the growth and development of plants. The macronutrients correspond to C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, and S (e.g., Rogiers *et al.*, 2006) and are part of the structural organic constituents of plants, whereas Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, and Cl are considered micronutrients and their function is related mainly to enzymatic activity (e.g., Marschner, 1995). Other elements, such as Na, Si, Co, V and I,

although not essential, have been termed beneficial in some plants (Broadley *et al.*, 2012; Marschner, 1995). In environments without anthropogenic intervention, plants mostly obtain N derived from biological fixation (Gruber and Galloway, 2008) and C, H, and O come from atmosphere and water (Jackson, 2014). The remaining macro-, micronutrients and beneficial elements are released from the lithosphere by weathering (e.g., Berner *et al.*, 2003; Brantley *et al.*, 2006).

Under earth surface conditions, most of the primary minerals that make up rocks are thermodynamically unstable and therefore susceptible to physical and chemical changes (e.g., Anderson *et al.*, 2007; White, 2003; Nesbitt and Young, 1984). Concomitant with chemical and physical weathering, substrate colonizing organisms promote the process of biogeochemical weathering of the parent material through their activity (e.g., Hong *et al.*, 2016; Pawlik *et al.*, 2016; Berner *et al.*, 2003), thereby initiating the soil formation process (Voroney, 2007) and the biogeochemical cycle of major and trace elements (Augustin *et al.*, 2016; Plante, 2007). Weathering processes occurring in managed systems, within the critical zone, support plant growth and human development, emphasizing the need for more complete studies of biogeochemical processes within agroecosystems (Amundson *et al.*, 2007; Brantley *et al.*, 2017).

Nutrient elements as well as trace elements can enter purposely to the soil as amendments (fertilizers, pesticides, etc.), or as undesired impurities or contaminants in agrochemicals, as well as by airborne particles, rainwater and irrigation water (Stevenson and Cole, 1999; Berner and Berner, 2012). Moreover, agricultural practices can modify many soil properties and the evolution of pedogenetic processes (Matson *et al.*, 1997; Bajard *et al.*, 2016).

Although most EMNs are very abundant within the earth's crust, physicochemical, biological, and geochemical factors can affect the relative availability of these nutrients (White and Zososki, 1999). Most plants have generated strategies to cope with these limitations and capture nutrients (Morgan and Connolly, 2013; Hermans *et al.*, 2006). Specifically, grapevines (*Vitis vinifera*) can respond physiologically, biochemically, and even genetically to nutrient deficiency (e.g. Tagliavini and Rombolà, 2001; Serra *et al.*, 2014) or metal toxicity (e.g. Cu in Cambrollé *et al.* (2015)).

Elemental concentrations found in grape berries reflect rootstock characteristics, differential varietal accumulation in berries (Rogiers *et al.*, 2006; Bertoldi *et al.*, 2011), climatic influences (Keller, 2015), and the elemental composition of vineyard soil (Jackson, 2014) in addition to the exogenous contribution of EMN associated with vineyards management and atmospheric

deposition (Larcher and Nicolini, 2008). Therefore, studying the EMNs cycle in the rock-soil-plant interface implies considering an integrated system and multi-matrix sampling design.

We hypothesize that geochemical characteristics of the soil parent material and local environmental conditions generate unique chemical imprints in the berries of *Vitis vinifera L.* Such imprints can be evaluated by comparing same cultivars grown under different geological and environmental contexts.

To address this hypothesis, we compared geochemical patterns of soils developed from parent materials with different lithologies in four similarly managed vineyards of Central Chile, the main wine-producing region of the country (Montes *et al.*, 2012). The study considers elemental analysis of the rock, soil, water and grape berries matrices from the plant-soil, local vineyard and regional scale.

Finally, while considering the relationship between the rock-soil-plant-water-atmosphere as part of an integrated critical zone system, the biogeochemical correlations of the EMNs in the soil and berries can be used to determine the influence of the parent rock, soil and environment on the inorganic chemistry of the berries, in addition to recognizing common parameters and characterizing the biogeochemical cycle of these elements in both the soil and plant systems.

## **2. METHODOLOGY**

### **2.1 VINEYARDS SELECTION, GEOLOGICAL MAPPING AND ROCK SAMPLING**

The main criteria for defining the study areas were geological characteristics (geomorphology and lithology) and latitude (climate) of the micro-basins where the vineyards are located as well as the vineyard management and grape varieties. Specifically, two pairs of vineyards with similar age were selected, two that cultivate cv. Pinot Noir and two vineyards with cv. Carmenere. The plants were ungrafted (without rootstock), trained in a vertical shoot position (VSP) trellis system and cultivated with a similar irrigation method (in this case, drip irrigation).

In March-April 2014, a geological survey of the micro-basin of each vineyard was performed, and geological maps (scale 1:20,000) differentiating the main lithological units were generated. In addition, a total of 94 samples of fresh rock from outcrops at four micro-basins were collected, in order to determine the petrography and geochemistry of the parent rocks present at each vineyard.



## 2.2 STUDY SITES

The studied micro-basins are located in Central Chile between latitudes 33° and 36° S. In this segment, the territory has three main N-S oriented morphological units: Coastal Cordillera, Central Depression and Andean Cordillera (Fig. 1). The studied vineyards are placed in the Coastal Cordillera piedmont and associated terraces. The altitude at the northern part of the Coastal Cordillera reaches approximately 2000 m a.s.l. and decreases toward the southern tip of the segment to ~600 m a.s.l.

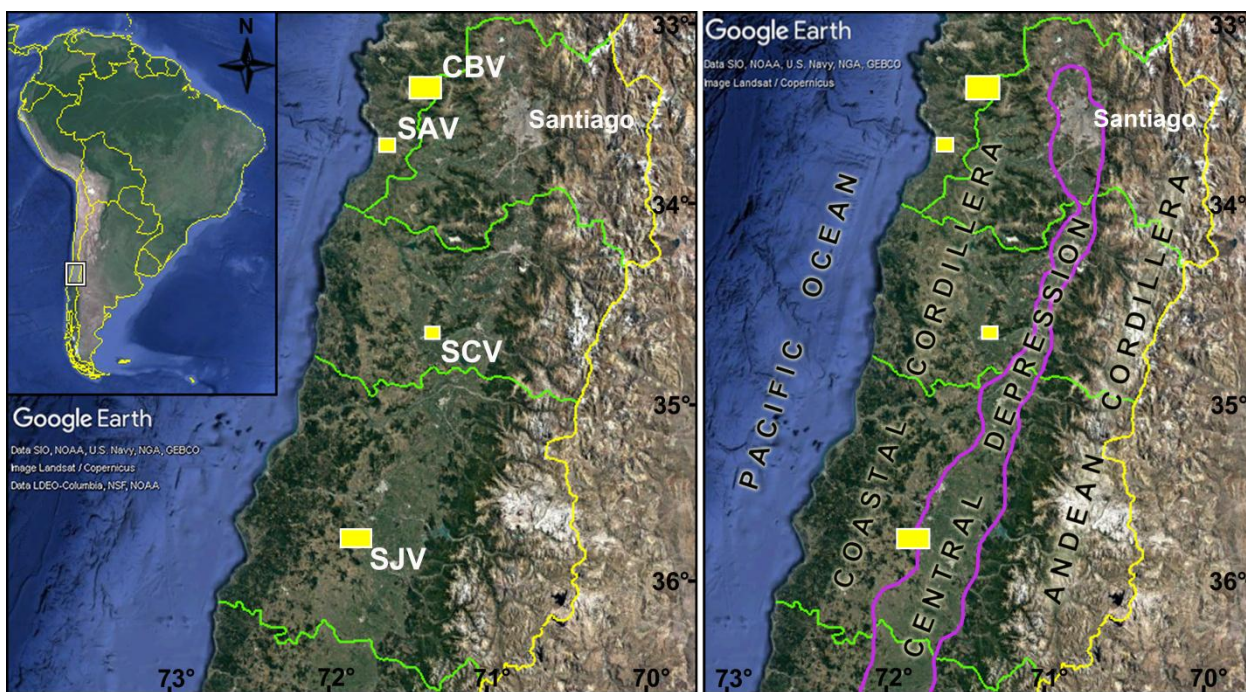


Fig. 1. Location map of the studied vineyards in Central Chile. Satellite images modified from Google Earth.

Central Chile is characterized by a Mediterranean type climate (e.g., Montes *et al.*, 2012; Le Roux, 2012), with annual rainfall concentrated in the winter months (June-August), varying from 300 mm in the north to 1300 mm in the south (DGA, 2016; Cosio *et al.*, 2007), and an average annual temperature that generally decreases from 15°C in the north to 13°C in the south (DGA, 2016).

The vineyards are located in the communes of Casablanca (CBV), San Antonio (SAV), Santa Cruz (SCV), and San Javier (SJV). The northern vineyards of CBV and SAV, chosen to evaluate plots planted with Pinot Noir cultivar, are found near urban and industrial areas. Plots of the Carmenere cultivar were studied in southern vineyards, including SCV and SJV which are located in areas where agricultural activity is prevalent.

The geography, geology, and climate characteristics of each micro-basin are presented in Table 1. Additional information of the local geology and geomorphology of each vineyard location is included in Table 2 and Supplementary Information 1.

## **2.3 SELECTION AND MAPPING OF PLOTS**

### **2.3.1 Selection of sampling points**

Samples were obtained at pre-defined management plots (usually > 1 ha) that presented relatively homogeneous crop conditions with plants of the same age and variety, and under common agricultural management (Table S1). One or two plots located in different areas within the vineyard were chosen, in which a systematic sampling of 12 equidistant points per vineyard was performed (Fig. S1). In the field, the exact location of the sampling point was selected based on the vine conditions such as the overall vigor and health of neighboring plants (in the same row). Under these selected plants, twelve soil pits were hand dug to a depth of 1.0-1.5 m to describe and sample the soil profiles.

### **2.3.2 Soil Description and mapping of plots**

For the mapping and sampling of the soils, a full soil profile description was performed following the protocol of Schoeneberger *et al.* (2012), recognizing parent materials and soil properties (Figs. S2 to S5). Collected data together with the general geologic map of the area were used to generate a “geo-pedological” map of each plot, at a scale of 1:5,000 (Fig. S1).

## **2.4 SOIL, WATER AND FRUIT SAMPLING**

### **2.4.1 Soil Sampling**

In each soil profile, soil horizons were sampled during the summer season of 2015 (January and February), obtaining approximately 3 kg of bulk soils from each soil horizon. A total of 181 samples were obtained for bulk soil geochemistry analysis.

The bioavailable nutrient pools were analyzed in genetic A and B horizons, where most of the root activity concentrates. These samples were sieved (2 mm) to remove clasts and roots. A total of 119 samples were obtained for elemental analysis of the bioavailable phase for all vineyards.

Table 1. Geology and geography of the four microbasins.

Vineyard	Morphological unit location	Geology of microbasin	Climate <sup>b</sup>	T° average <sup>b</sup>	Annual rainfall <sup>b</sup>
Casablanca (CBV)	Piedmont of Coastal Cordillera (33.3°S)	Granitic plutons ( $158 \pm 1$ Ma) <sup>a</sup> intruded by aplitic dikes. Landslide, colluvial, alluvial and fluvial deposits (Holocene).	Semiarid Mediterranean climate with a strong marine influence.	13.6°C	450 mm (June to August)
San Antonio (SAV)	Raised marine terraces in Coast (33.6°S)	Metamorphic rocks (Upper Triassic- Upper Jurassic) <sup>a</sup> and Marine sedimentary rocks of the Navidad Formation (Miocene-Pliocene) <sup>a</sup> .	Mediterranean climate with a coastal influence and a dry season.	14.5°C	380 mm (May to July)
Santa Cruz (SCV)	Piedmont of Coastal Cordillera (34.6°S)	Granitic plutons (123 to 85 Ma) <sup>c</sup> and fluvial, old fluvial, fluvial-alluvial, alluvial and colluvial deposits (Holocene).	Subhumid Mediterranean climate with dry and hot summer.	14.7°C	684 mm
San Javier (SJV)	Coastal Cordillera and Central Depression (35.7°S)	In hills: Volcanic rocks of the Lo Valle Formation (Upper Cretaceous) <sup>c</sup> and intrusive rocks (Jurassic) <sup>c</sup> . In the valley: Pyroclastic deposits (Pleistocene) <sup>c</sup> .	Subhumid Mediterranean climate with a dry summer and rainy and cold winter.	14.4°C	884 mm

<sup>a</sup> Gana *et al.*, 1996; <sup>b</sup> Nahrwold, 2014; <sup>c</sup> SERNAGEOMIN, 2004.

Table 2. Geomorphology, parent materials and soil classification (USDA) of studied plots.

Vineyard	Geomorphology in plots	Slope direction	Slope grade	Parent material	Soil order/ Soil family
Casablanca (CBV)	Piedmont (VP)	West to Northwest	5°	- Landslide/Colluvial Deposit: Pits VP-1, VP-2 and VP-3. - Alluvial Deposit: Pits VP-4, VP-5 and VP-6.	Inceptisols (Tapihue Series) Typic Xerochrepts <sup>a</sup>
	Hill (VC)	Different exposures to the sun	2° to 15°	- Tonalite: Pits VC-8, VC-10, VC-11 and VC-12. - Aplite: Pit VC-9 - Colluvial Deposit: Pit VC-7.	Alfisols (Lo Vásquez Series) Ultic Haploxeralf <sup>a</sup>
San Antonio (SAV)	Terrace (CT)	Flat slope	Flat slope	- Marine sedimentary sequence (Intervened): Pits CT-1 to CT-9	Mollisols (Bochinche Series) Typic Haploxerolls <sup>a</sup>
	Slight slope (CP)	Southeast	1° to 2°	- Marine sedimentary sequence: Pits CP-10 to CP-12.	Mollisols (Bochinche Series) Typic Haploxerolls <sup>a</sup>
Santa Cruz (SCV)	Alluvial fan (LI)	Flat slope	Flat slope	- Fluvio-alluvial Deposit: Pits LI-1 to LI-9. - Paleochannel (Fluvial Deposit): Pit LI-5.	Entisols (Mancumán Series) Typic Xerofluvents <sup>b</sup>
	Steep slope (LP)	South	6° to 22°	-Granodiorite: Pits LP-10 and LP-12. -Colluvial Deposit: Pit LP-11.	Alfisols (Lajuela Association) Ultic Haploxeralfs <sup>b</sup>
San Javier (SJV)	Flood plain (Ms)	Flat slope	Flat slope	-Sedimentary Deposit (Lacustrine): Pits Ms-1, Ms-2, Ms-3, Ms-6, Ms-9 and Ms-12	Alfisols (Caliboro Series) Typic Endoaqualfs <sup>c</sup>
	Flood plain (Mv)	Flat slope	Flat slope	- Vitreous Tuff: Pits Mv-4, Mv-5, Mv-7, Mv-8, Mv-10 and Mv-11	Inceptisols (Vaquería Series) Aquic Durochrepts <sup>c</sup>

<sup>a</sup> CIREN, 1997a; <sup>b</sup> CIREN, 1996; <sup>c</sup> CIREN, 1997b

### **2.4.2 Water**

In the field, three types of water samples were taken: rainwater, irrigation water, and groundwater. All materials used for the collection and storage of water were previously filled with 10% HNO<sub>3</sub> for three days and then washed with demineralized water to remove impurities.

Samples of rainwater were taken in August 2015 (during the winter season) using a previously acid cleansed rainwater collector consisting of a bucket with a container inside protected with a fine mesh.

Groundwater samples were taken in the winter (August and September 2015) and in summer (January and February 2016) seasons; the samples were collected from wells using, in most cases, a Bailer sampler, from where the local water table was encountered. The first three samples were used to condition the bailer and were then discarded. The fourth sample was preserved.

Finally, irrigation water sampling was carried out in January and February 2016 (during the summer season). To collect the samples, clean plastic cups were placed under the drippers, collecting at least 250 ml of water. In addition, the irrigation water reservoirs in all the vineyards were sampled.

Fifty millimeters of each sample of rainwater, irrigation water, and groundwater were filtered using a syringe with a 2- $\mu$ m syringe filter. Water samples were preserved by adding 1 ml of 65% Suprapur® nitric acid to prevent the precipitation of cations. The samples were kept at cold temperatures (< 2°C) until transported to the laboratory. The tubes, syringes and containers were rinsed three times with the water to be sampled before collecting the final sample.

### **2.4.3 Berries**

The berries were harvested at least three weeks after veraison, during the summer season of 2015 (March to April), as the concentrations of most of the chemical elements are stabilized in the grapes approximately 20 days after veraison (Bertoldi *et al.*, 2011). In addition, the Brix degrees of berries were used as a criterion for ripening, ensuring that the ripeness of sampled fruit was similar in grapevines of the same cultivar.

In each of the 12 sampled points, the berries were collected from fifty grape clusters from the selected grapevine and from two adjacent plants in the same trellis (ten clusters per plant). There were 13 composite grape samples (12 sampled points plus 1 duplicated sample) taken from each vineyard, totaling 52 samples. At each sampling site, a total of 350 berries were



sampled, from which 300 berries were randomly selected for chemical analysis and 50 berries were used to measure Brix degrees. The berries were collected from clusters of average size, located in different areas of the canopy and from different points of the cluster, that is, the upper, lower, and middle sectors of the cluster, ensuring that the berries were of an average size. Each berry was collected by cutting the pedicel with scissors and then storing it in a high-density plastic bag.

## 2.5 CHEMICAL ANALYSIS

Total elemental analysis of parent rocks was performed at Bureau Veritas Laboratory (Vancouver, Canada). Samples were pulverized to a fraction  $<75\ \mu\text{m}$  and two aliquots containing 1 g of sample each were analyzed. The first 1 g sample was mixed in a crucible with lithium metaborate and tetraborate flux. The mixture was fused in an oven, cooled and re-dissolved in nitric acid, and then subjected to inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) to identify major oxides in rocks, such as  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , and  $\text{MnO}$ . The second aliquot was digested in a solution of "modified Aqua regia" and analyzed via ICP-MS for the determination of metals, such as Cu and Zn.

Soils were dried in a convective-oven at  $60^\circ\text{C}$ . Consecutively, the samples were homogenized, and quartered to 250 g of material, and pulverized to less than  $75\ \mu\text{m}$  ( $<200$  mesh). Lastly, 30 g of sample were obtained. This subsample was sent to Bureau Veritas Laboratory in Vancouver (Canada), where the same analytical procedure used for whole-rock was applied.

For the chemical analysis of the bioavailable phase, the mobile metal ion (MMI) technique developed in SGS Laboratory (Toronto, Canada) was used. This technique consists of the mixing of 50 g of soil sample with 50 ml of a solution containing organic strong ligands (Mann *et al.*, 2014) capable of complexing soil particle adsorbed ions, thereby extracting them into the soluble species (Mann, 2010). The determination of major, minor, and trace elements was performed via ICP-MS.

The samples of berries were analyzed at Agrolab Laboratory (Santiago, Chile). The sample preparation begins by washing the berries with distilled water and then juicing from a mash containing all the fruit (skin, seeds and pulp). For N determination, the Kjeldahl methodology was used (e.g. Saéz-Plaza *et al.*, 2013), whereas for P and B, the photolorimetric method was performed (e.g. Larcher and Nicolini, 2008). Elements K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, and Cu were identified via ICP-OES (e.g. Mitic *et al.*, 2012).

All water samples were sent to Bureau Veritas Laboratory (Vancouver-Canada), where the samples of acidified water were analyzed directly via ICP-MS to determine trace and ultra-trace elements.

The standards and detection limits of all analytical techniques are presented in Table S2.

## **2.6 DATA ANALYSIS**

### **2.6.1 Quality Control of data**

To evaluate the reliability of the chemical measurements in all the matrices (soil, berries and water), duplicate and blank samples were included. During field sampling, 10% of the total samples were taken in the form of duplicates. At Bureau Veritas Laboratory, analytical duplicates, standards and blank samples were also incorporated. Quality control (QA/QC) was performed by determining the relative average of total and analytical error using the calculation of the squared variation coefficient ( $CV^2$ ) and the percentage of the coefficient of variation (CV%) (Stanley and Lawie, 2007). For this study, it was considered that variables showing total and analytical errors greater than 25% and 20%, respectively, provided poor quality information.

The quality control showed good performance of the measurements for all variables and matrices (Table S3). Specifically, the whole soil, the soil bioavailable phase, the berries and the water measurements indicated low total errors, with a CV% varying from 0.1% for K in waters and 23.4% for P in the bioavailable phase. Also a relatively high analytical error was only calculated for Cu (CV = 20%) in water samples. On the other hand, Fe in water samples had a low analytical response, with 87% of the data below the detection limit (Table S3).

### **2.6.2 Parent rocks**

In each vineyard, one to two rock samples, defined as representative of the parent rocks of the studied soils, were selected. In CBV, the tonalite and aplite rocks were studied; in SAV, arkose was defined as the parent rock; in SCV, the parent rock corresponded to a granodiorite; and in SJV, a vitreous tuff was considered as the parent rock. Mineralogical and textural characteristics of the rocks are presented in Table S4.

### **2.6.3 Soils and berries**

For the data of whole soil, bioavailable phase and berries the Kruskal-Wallis tests, at the 95% confidence level, were performed to compare the average concentrations of the elements among the four vineyards.

In the study of the bioavailable phase, the percentage of bioavailability (% bioavailability) of an element in the soil was determined. These values were calculated using the equation presented in Mann *et al.* (2012) and Albanese (2008):  $\%Bioavailability = A / B \times 100$ , where *A* and *B* are the concentrations of a certain element in *A*, the soil bioavailable phase, and in *B*, the whole soil chemistry.

To determine the biogeochemical associations between soil and berries a Factor analysis (FA) (Kaiser, 1958; Goovaerts, 1993; Davis, 2002) for data from each vineyard was performed, using the software XLSTAT2017. This multivariate analysis allows for the reduction of the information contained by 52 variables to a limited number of factors. The 52 variables correspond to the elements K, P, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn and Cu measured in the three horizons of whole soil (27 variables), the two horizons of bioavailable phase (16 variables, Na was not analyzed) and in the berries (9 variables). Additionally, in order to consider the spatial variability of each element in the plots and/or parent materials, distribution graphs of the EMNs in the horizons and matrices along the twelve sampling points were generated.

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

#### 3.1 DISTRIBUTION OF ESSENTIAL NUTRIENTS IN ROCKS AND SOILS

##### 3.1.1 Parent rocks

Geochemical results of parent rocks are displayed in Table S5. Additionally, Figures 2A and 2B show the concentration patterns of the elements Ca, Fe, Na, K, Mg, Mn, P, Zn, and Cu. From these graphs, it can be observed that the granitoid rocks, tonalite of CBV and granodiorite of SCV had similar elemental composition patterns, with higher concentrations of Ca, Fe and Mg for the tonalite (CBV) and of Na, K and Cu for the granodiorite (SCV). The aplite (CBV), arkose (SAV) and tuff (SJV) parent rocks exhibited particular patterns, all of which were distinct (Fig. 2B).

When comparing the different rocks under study, the tonalite (CBV) had the lowest value of Cu; also in CBV, the aplite rock had the highest concentrations of K, but the lowest contents of Fe, Mg, Mn and Zn. In SAV, the arkose displayed the highest values of Ca, Fe, Mg, Mn, P, Zn, and Cu and the lowest concentrations of K and Na. The granodiorite of SCV showed the highest contents of Na. Finally, the vitreous tuff of SJV, in comparison to the other rocks, had a lower concentration of all the elements; particularly for Ca, Na and P (Table S5).

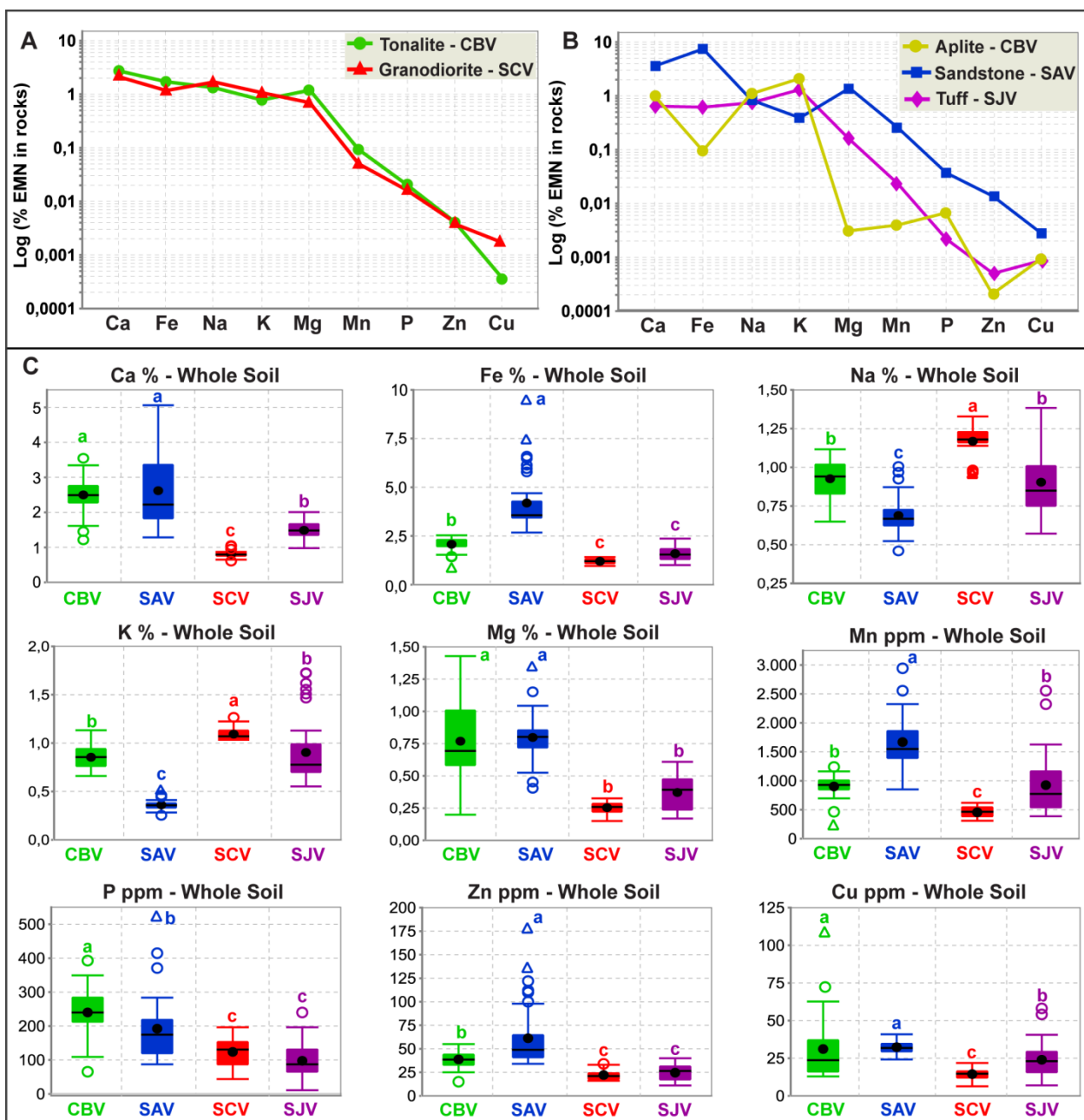


Fig. 2. Distribution of essential nutrient (EMN) in the parent rocks and whole soil: (A) Geochemical patterns of Tonalite of Casablanca and Granodiorite of Santa Cruz. (B) Geochemical patterns of Aplite of Casablanca, Sandstone of San Antonio and Tuff of San Javier. (C) Boxplots of EMN concentrations in the whole soil of the four studied vineyards. The letter above each bar indicate statistically significant differences at  $p < 0.05$ .

### 3.1.2 Soils

The full geochemistry results for both the whole bulk soil and soil bioavailable fractions are presented in Tables S6 and S7, respectively. Box plots illustrating the concentration media and overall distribution of the EMNs in the four studied vineyards are displayed in Figures 2C and 3.

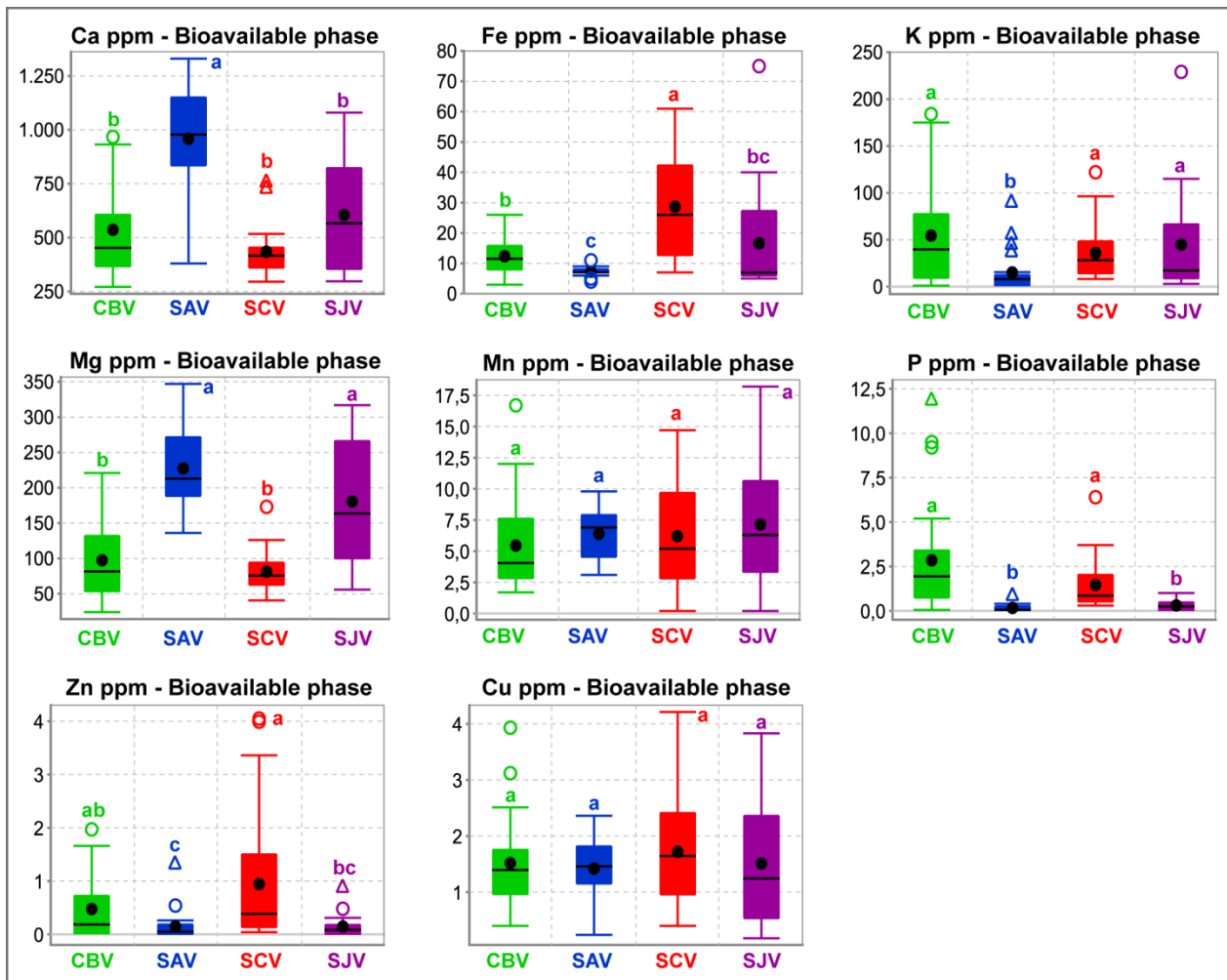


Fig. 3. Boxplots of EMN concentrations in the soil bioavailable phase of the four studied vineyards. The letter above each bar indicates statistically significant differences at  $p < 0.05$ .

Among all studied vineyards, SAV soils, located on the coast, were significantly enriched in Fe, Mn, Zn and Cu and relatively poor in Na and K (Table S6, Fig. 2C). On the other hand, a similar geochemical pattern was observed for the northern vineyards, CBV (33.3° S) and SAV (33.6° S), displaying average Ca, Fe, Mg, P and Zn concentrations significantly higher than the southern vineyards SCV (34.6° S) and SJV (35.7° S). Finally, in the SCV soils, the average contents of K and Na were significantly higher, whereas the contents of Ca, Fe, Mn, and Cu were significantly lower (Fig. 2C) than the other vineyards.

Regarding the soil bioavailable phase, the average concentrations of Mn and Cu were similar among all the vineyards. In CBV, the soil had the highest average content of bioavailable K, however, it was only significantly higher with respect to the bioavailable K of SAV soils (Fig. 3). The highest average value of Ca was found at SAV; this could be related to the existence of weathered shells in the soil profile. Additionally, it is interesting to note that in SAV soils, the average concentration of bioavailable Fe and Zn was the lowest among all studied vineyards



(Fig. 3), whereas the Fe and Zn content in the whole soil was the highest (Figs. 2C). The low mobility of these elements could be related to the presence of shells, which can favor metal retention due to an increase in pH, as was described by Fernández-Calviño *et al.* (2016) and Ok *et al.* (2011). In contrast, the SCV soil exhibited the highest averages of bioavailable Fe and Zn (Fig. 3), which could be explained by the low pH values in this soil ( $5.6 \pm 0.7$ ).

Finally, the granitic soils at CBV and SCV displayed the highest average concentration of bioavailable P and the lowest mean content of bioavailable Mg (Table S7, Fig. 3).

### **3.2 DISTRIBUTION OF ESSENTIAL NUTRIENTS IN WATERS**

The results of EMNs in waters are presented in Table S8 and Figure 4. CBV and SCV displayed similar concentrations in irrigation water and groundwater for most of the elements (Figs. 4A and 4C). The irrigation water for both locations comes from groundwater, and both basins have a lithology dominated by granitic rocks. Conversely, the irrigation water used in SAV and SJV exhibited lower concentrations for most of the studied elements respect to groundwater, except for Zn and Fe (Figs. 4B and 4D). This result is expected since the irrigation water in SJV comes from an irrigation canal originating from the Putagán River and SAV irrigation water is derived partially from groundwater and surface water.

The rainwater sampled in all areas presented considerably lower concentrations of overall elements than irrigation and groundwater (Figs. 4A to 4D).

The normalization of rainwater and irrigation water by groundwater (RW/GW and IW/GW, respectively) allowed the evaluation of the chemical influence, external to the rock-soil-groundwater system (Table S8; Figs. 4E and 4F). Irrigation water in the area of CBV presented a high enrichment of Cu and a lower content of Mn compared to groundwater (Fig. 4E), whereas rainwater also appeared enriched in Cu with respect to groundwater (Fig. 4F). In SAV, the irrigation water was enriched with respect to groundwater in Fe, Zn, and  $\pm$  Cu, while rainwater was enriched with respect to groundwater in Zn. In SCV, the irrigation water showed enrichment of Cu and Zn compared with groundwater, whereas the rainwater was higher in Zn respect to groundwater. Finally, in the case of SJV, the irrigation water and rainwater were enriched in Fe and Zn in comparison to groundwater (Figs. 4E and 4F).

The high content of Fe in rainwater, and likely in irrigation water, can be attributable to soil dust from wind erosion as described by Berner and Berner (2012). On the other hand, the high presence of Zn and Cu in irrigation water can be mostly related to the application of agrochemicals for both fertilization and pesticide use (e.g. Brunetto *et al.*, 2017; Komárek *et al.*,

2010; Fernández-Calviño *et al.*, 2012), which are incorporated directly into the soil by irrigation water or through foliar applications. Nevertheless, based on the composition of rainwater, the atmospheric pollution by industrial activities, mainly occurring in the surrounding areas of the northern vineyards (CBV and SAV), cannot be disregarded.

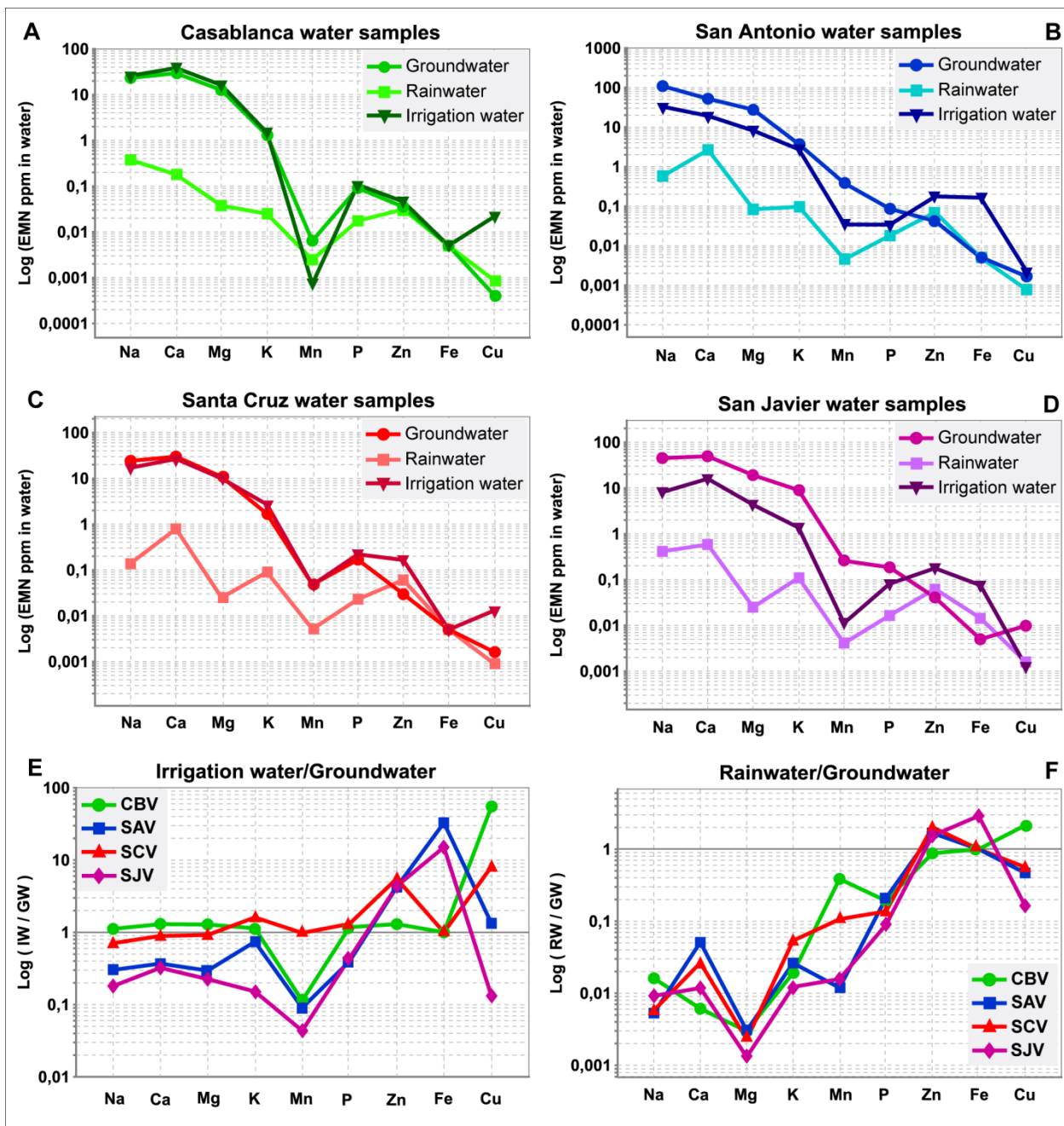


Fig. 4. Multi-elemental diagrams with the mean content of EMNs in the matrices: rainwater (RW), irrigation water (IW) and groundwater (GW) in CBV (A), SAV (B), SCV (C) and SJV (D). Multi-elemental graphs with the ratio of IW/GW (E) and RW/GW (F).

### 3.3 ROCK-SOIL-ENVIRONMENT GEOCHEMICAL RELATIONSHIP

To determine the geochemical changes that the soil undergoes in relation to the parent rock, multielement graphs were analyzed in which the concentrations of the whole soil chemistry and bioavailable phase were normalized by the content of the EMNs in the parent rock (Figs. 5A to 5D).

From these graphs, CBV soils showed an important enrichment of Cu with respect to the rock, which was also expressed in the bioavailable phase (Fig. 5A). The low Cu concentration in the parent rock (tonalite) suggests an anthropogenic influence, which was supported by the high concentrations of Cu in irrigation water and rainwater. Other studies indicate that this Cu accumulation in soil is conditioned by fungicide applications (Brunetto *et al.*, 2016; 2017), continuous use of cupric compounds (Gómez-Armesto *et al.*, 2015), and extensive grape cultivation (Orescanin *et al.*, 2003).

In CBV (except for Cu), SAV and SCV (Figs. 5A, 5B and 5C), parent rock and soil geochemistry were similar, as indicated by a distribution pattern very close to 1 (normalization of the parent rock), as well as was determined by Acosta *et al.* (2011) in different parent materials of virgin soils. Still, a slight decrease of Ca, Na, Mg, Mn, P, and Zn in the soils with respect to their parent rock occurred. Conversely, SJV showed a remarkable enrichment of these elements, in addition to an enrichment of Fe and Cu (Fig. 5D). The enrichment in this vineyard is most likely the result of the application of agrochemicals and its consequential sorption onto clays and association with organic matter. Molina *et al.* (2009) reported high contents of Fe, Cu, Zn and/or Mn, between other pollutant metals, in some phosphorus fertilizers and micronutrient sources used in Chile; they suggest that the long-term use of these agrochemicals could cause accumulation of metals in agricultural soils.

Deficiency of an EMN in soil with respect to the parent rock indicates the loss of a chemical element from the soil profile; these losses can occur due to i) dissolution of primary minerals by chemical and biological weathering (e.g., Brantley *et al.*, 2006; Hong *et al.*, 2016) and subsequent leaching and dissolution in the groundwater (e.g., Jin *et al.*, 2010), ii) remobilization during translocation processes (e.g., White, 2005), and/or iii) plants uptake (in this case mostly by *Vitis vinifera* L.). On the other hand, the enrichment of a certain element in the soils can be generated by i) organic matter accretion (litter, root exudates, etc.) and complexation or adsorption to soil organic matter, and/or ii) adsorption onto secondary minerals and precipitation as secondary minerals. In both cases, the element will tend to accumulate in a particular horizon where soil conditions favor its enrichment (e.g., White, 2005). However, in managed

environments, an overall enrichment of EMNs in surface horizons reflect mostly exogenous or anthropogenic additions (Derry and Chadwick, 2007).

In the bioavailability multielement graphs (Figs. 5E to 5H), patterns seems very similar to those observed when comparing the available phase of the soil and the parent rock (Figs. 5A to 5D). It can be observed that Fe and  $\pm$ K, had low bioavailability (<0.5%). The poor iron bioavailability can be explained by the high reactivity of this element, which tends to be precipitated as an oxide under the pH and redox conditions of most well-drained soils (Morrissey and Guerinot, 2009). Similarly, bioavailable K tends to be low in soils as a result of rapidly absorption by roots and fixation in 2:1 clays like vermiculite (Rees *et al.*, 2013), which is expected to be high in the soils originated by granite (Graham and O'Geen, 2010). In contrast, high Cu, Mg, Ca and Zn bioavailability (>1%) were determined in all vineyards. These metals may be adsorbed onto sorptive species as clays and/or organic matter (Chorover *et al.*, 2007) and therefore are available to the plant. However, while rock-major elements Mg and Ca are likely the result of weathering of silicate minerals (Berner *et al.*, 2003), most of the rock-trace elements content, such as Cu and Zn, likely derive from an exogenous source to the rock-soil system, which was supported by irrigation water and rainwater hydrochemistry (Figs. 4E and 4F).

Marked differences in P bioavailability were measured as being high in the soils formed from aplite and semi-consolidated deposits in the piedmont of CBV (Fig. 5E), moderate in soils developed on granitoid rock such as tonalitic soils in CBV (Fig. 5E) and granodiorite soils of SCV (Fig. 5G), low in SJV soils formed from volcanic materials (Fig. 5H), and very low in SAV soils (Fig. 5F). The low bioavailability of P in SAV could explain, along with other parameters, the low yield of grapes in this vineyard (Jackson, 2014).

### **3.4 DISTRIBUTION OF ESSENTIAL NUTRIENTS IN THE BERRIES**

In general, similar nutrient patterns were observed for both, the fruits of the cv. Pinot Noir and those of the cv. Carmenere (Fig. 6), with statistically comparable averages for N, Cl, Na, and B in all the vineyards (Fig. S6). Potassium was the most abundant element in Carmenere berries (Fig. 6A), consistent with the results of Rogiers *et al.* (2006) for Shiraz berries and Bertoldi *et al.* (2011) for Chardonnay berries. However, in Pinot Noir berries, the concentrations of N and K were similar (Figs. 6A and 6C).

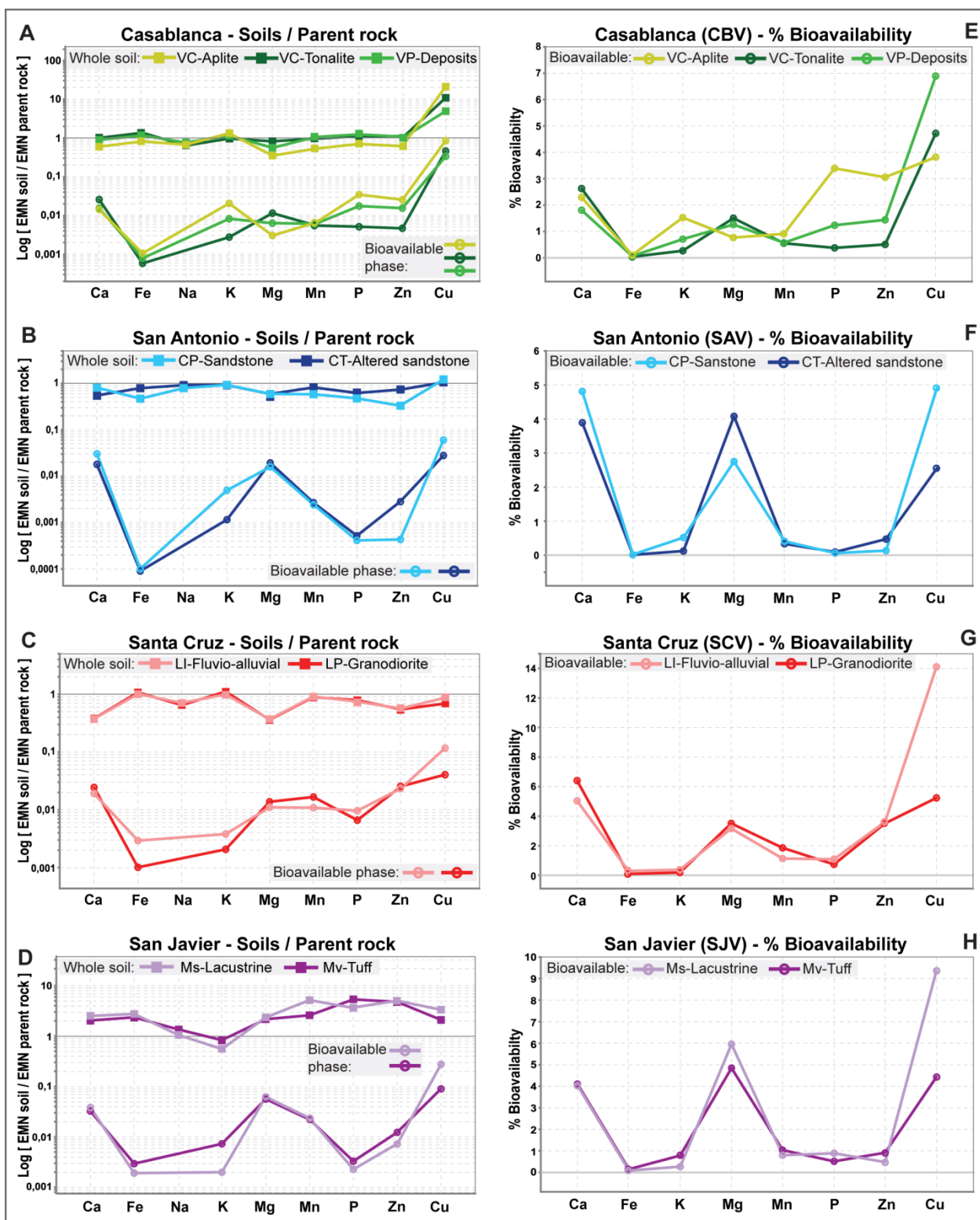


Fig. 5. Multielemental diagrams for EMNs in whole and bioavailable soil of four vineyards. Left panels: EMN patterns showing contents of whole soil (square; upper trend) and soil bioavailable phase (circles; lower trend) normalized to EMN contents of parent rock, for soils in the two plots (or parent materials) at vineyards CBV (A) SAV (B), SCV (C) and SJV (D). Right panels: Multielemental diagrams with the percentage of bioavailability (% bioavailability = EMN in bioavailable soil / EMN in whole soil \* 100) for soils of CBV (E) SAV (F), SCV (G) and SJV (H).



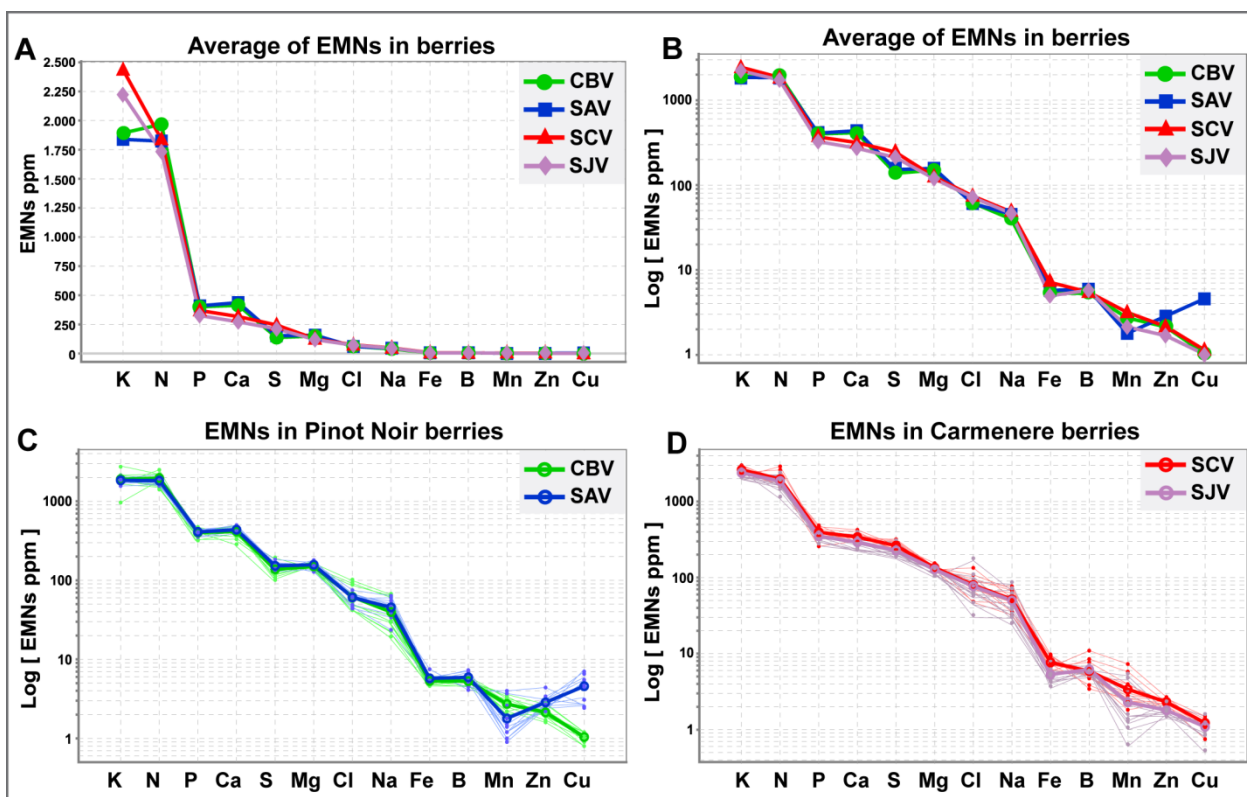


Fig. 6. Distribution patterns of EMN in berries (A) Mean contents in ppm for the four studied vineyards. (B) Logarithmic scale of mean contents for the four studied vineyards. (C) EMN patterns for berries of cv. Pinot Noir (CBV and SAV) and (D) EMN patterns for berries of cv. Carmenere (SCV and SJV).

Other differences between cultivars were observed, including significantly higher concentrations of Ca and Mg in the berries of the cv. Pinot Noir and of K and S in the Carmenere berries (Fig. 6A and 6B). For P, there were higher average values in the Pinot Noir berries, although these higher averages were statistically significant only when compared with the SJV berries (Table S9, Fig. S6).

These results could indicate particular characteristics in the chemical composition of berries of different cultivars and to the differential accumulation rates that the elements have in the berries (Rogiers *et al.*, 2006). In grape berries, the elements K, P, S, Mg, B, Fe, and Cu are nutrients that continue to accumulate through the growth and maturation stages of the berry, unlike the elements Ca, Mn, and Zn, which mostly accumulate only until veraison (Rogiers *et al.*, 2006). This effect could explain why K and S exhibited higher concentrations in cv. Carmenere compared to cv. Pinot Noir, as Carmenere berries were harvested with more advanced maturity, according to the average Brix degrees (Table S9; Fig. S6); however, it does not explain the enrichment in terms of Mg and partial enrichment of P in the fruits of the cv. Pinot Noir (Fig. S6).

In this study, the behavior of Mg in berries would be more in line with Bertoldi *et al.* (2011), as described for Chardonnay berries which represents an element that accumulates only until

veraison. However, the high Mg content in the Pinot Noir berries from the vineyards located in the northern CBV and SAV sites can also be a reflection of the higher Mg content in the chemistry of rocks and whole soil in these areas (Fig. 2; Tables S5 and S6), an aspect that is also recognized by Fabani *et al.* (2009) in soils and grapes of Argentina. Additionally, windier conditions in these sites (CBV and SAV), that promote berry transpiration (Keller, 2015), could also explain higher contents of Mg since the accumulation of Ca, Mg, and K in berries increases with rate transpiration (Düring and Oggioni, 1986).

Carmenere berries at the SJV site displayed a slight decreased content pattern compared to those of the SCV (Fig. 6D; Table S9), with statistically significant lower values for Zn and Fe (Fig. S6). This could be explained by the agricultural management of SCV since, after veraison, a cluster thinning was performed, which could increase the content of EMNs in the berries. This difference may also reflect the contrasting drainage conditions of both vineyards. While SCV plots were characterized by soils with a higher infiltration capacity, the vitreous tuff of SJV behaves as an impermeable layer inducing the endosaturation of soil, which could produce negative effects on the plant nutrient uptake (Steffens *et al.*, 2005) and grape quality (Jackson, 2014). Furthermore, higher values of Zn and Fe in the SCV's berries were correlated with the elevated contents of these elements in the bioavailable phase.

Despite the differences between cultivars, berry nutrient concentrations of elements like Zn, Cu, Fe, and Mn had a particular distribution in some vineyards. For example, the significantly higher concentrations of Cu and Zn in the SAV berries (Figs. 6C and S6) may reflect not only the application of foliar agrochemicals (which was evident for Cu) but also the local lithological, geochemical, and environmental aspects of the vineyard, considering the high concentrations of these elements in the chemistry of the parent rock (Fig. 2B; Table S5), whole soil (Fig. 2C; Table S6), and irrigation water (Fig. 4E; Table S8).

In addition, soil physicochemical conditions (Table S1) could explain the higher contents of Fe in the SCV berries (Fig. S6), considering the high content of bioavailable Fe and Zn (Fig. 3), principally in the fluvioalluvial plot (Fig. 5C) which is a response to a comparative low soil pH, induced by acidic control of parent material (granodiorite) that interacts with the shallow water table (2.2-8.8 m below surface).

Lastly, higher average contents of Mn in the CBV and SCV grapes (Fig. S6), were in accordance with the lithological characteristics of the parent materials (granitoid rocks).

In summary, factors including not only the cultivar but also the age of the plant, parent material composition, soil properties, climate, and agricultural management are influencing the elemental content of the grape as was previously described by Protano and Rossi (2014).

### **3.5 SOIL-BERRY BIOGEOCHEMICAL RELATIONSHIP**

Results obtained through Factor Analysis (Table 3) showed linear associations between some EMNs in berries and soils for all the studied vineyards. In certain cases, these associations were strongly influenced by a particular pit or a group of pits (Figs. S7 to S10), which was mostly related to intrinsic differences in the geochemistry of soil parent materials.

In CBV, the bioavailable K had a direct correlation with the K in fruits (Table 3; Fig. S7A). In SAV, a positive correlation between soils and berries for the elements K (Fig. S8A), Fe (Fig. S8B), Mg (Fig. S8C), Na (Fig. S8D), Cu (Fig. S8E) and Zn (Fig. S8F), was identified (Table 3), highlighting the good correspondence between soil and fruit in this vineyard.

The EMNs Fe (Fig. S9B), Mg (Fig. S9C), Na (Fig. S9D) and Cu (Fig. S9E) were correlated in soil and berries in SCV (Table 3). It should be noted that these elements had also positively correlated in SAV. Finally, SJV only showed a high correlation in soils and fruits for K (Table 3; Fig. S10A), as was the case of the CBV and SAV vineyards.

In summary, the principal tracer element of soil in berries was K, which was recognized in three vineyards (CBV, SAV and SJV). Additionally, Na, Cu, Fe and Mg were tracers of soils in two vineyards (SAV and SCV) and Zn was only a tracer in SAV.

Finally, the association Zn-Mg-P±Ca recognized in berries of SCV and SJV (Table 3), both of cv. Carmenere, and the inverse correlation of P and Mn in vineyards cultivated with cv. Pinot Noir (CBV and SAV; Table 3) indicated multi-elemental differences between cultivars.

### **3.6 INTEGRATION OF THE ROCK-SOIL-WATER-BERRY INTERPHASE**

Although the EMNs in berries can vary greatly as a result of their mobility in the vascular bundles (Rogiers *et al.*, 2006) and the degree of fruit maturation (Bertoldi *et al.*, 2011), our univariable analysis of EMNs in fruits showed a very similar pattern between berries of the same cultivar. Such was the case for the elements Ca, Mg and P which were enriched in Pinot Noir berries, while K and S were concentrated in Carmenere berries. This was independent of the vineyard location and parent material lithology, evidencing a particular EMN distribution according to the studied cultivar. Similarly, we found common patterns between berries of the same variety using

multivariable analysis, highlighting the association Zn-Mg-P for Carmenere berries and the inverse correlation between P and Mn for the berries of cv. Pinot Noir.

Table 3. Factor Analysis (FA) results for the studied vineyards. Representative variables of each factor are presented according to the matrices: whole soil, soil bioavailable phase and grapes berries.

Representative variables are those with correlation coefficients >0.5 and <-0.5. HA, HB and HC denote different sampled horizons. (\*) indicates variables with negative correlations (<-0.5).

	FA	Representative variables (Correlation: >0.5; <-0.5)			<sup>1</sup> Cum. Var. %
		Whole soil chemistry	Bioavailable phase	Berries	
CASABLANCA	F1	Mg-HA,HB,HC / Ca-HA,HB,HC / Fe-HA,HB,HC / <b>(K-HA,HB,HC*)</b>		<b>(Zn*)</b>	22.4
	F2	Na-HA	K-HA,HB / P-HA,HB / Fe-HA / Zn-HA / <b>(Mg-HA,HB*)</b> / <b>(Ca-HA,HB*)</b>	K, Ca	43.6
	F3	Cu-HA,HB,HC / <b>(Mn-HA,HB,HC*)</b>	Cu-HB	Fe	57.7
	F4	Zn-HA,HB,HC / P-HA,HB,HC			68.2
	F5	Na-HB,HC	<b>(Cu-HA*)</b>		77.7
	F6		Zn-HB / Fe-HB		83.7
	F7		Mn-HA,HB	Cu, Mg	89.4
	F8			Mn, <b>(P*)</b>	93.8
	F9			Na	98.1
SAN ANTONIO	F1	Mn-HA,HB / Fe-HA,HB / Zn-HA,HB	Zn-HA,HB / Fe-HA / Mn-HB	Zn, Fe	21.2
	F2	Na-HB / K-HB / Mg-HA / <b>(Zn-HC*)</b> / <b>(Fe-HC*)</b> / <b>(P-HC*)</b> / <b>(Mg-HC*)</b>	Cu-HA,HB	P, Ca, <b>(Mn*)</b>	38.5
	F3	Cu-HA,HB / Ca-HC	Fe-HB / Ca-HA,HB / <b>(Mg-HB*)</b>	Cu, <b>(Mg*)</b>	53.7
	F4	Na-HA / K-HA / <b>(Ca-HA,HB*)</b> / <b>(Cu-HC*)</b>		Na	64.3
	F5	K-HC / Na-HC	<b>(K-HB*)</b>	<b>(K*)</b>	74.0
	F6	P-HA,HB	P-HA,HB / <b>(Mn-HA*)</b>		82.9
	F7	Mg-HB	Mg-HA		89.2
	F8	Mn-HC	<b>(K-HA*)</b>		94.9
SANTA CRUZ	F1	Cu-HC / Zn-HC / <b>(K-HA-HB-HC*)</b>	Fe-HA,HB / Cu-HB / <b>(Mg-HA*)</b> / <b>(Ca-HA*)</b>	Cu, Fe, <b>(Mn*)</b>	20.7
	F2	Ca-HA,HB / Na-HA,HB / P-HA / <b>(Cu-HB*)</b>	Mg-HB / Ca-HB / P-HB	Na	37.6
	F3	Cu-HA / Zn-HA / Fe-HC / P-HC / Mn-HA	Zn-HA / K-HA / P-HA		51.3
	F4	Na-HC / Ca-HC / Mg-HC		P, Mg, Zn	62.9
	F5	P-HB / Fe-HB / Mg-HB / Zn-HB	<b>(Cu-HA*)</b>		73.9
	F6	Fe-HA / <b>(Mn-HC*)</b>	Mn-HA,HB / <b>(K-HB*)</b>		81.2
	F7		Zn-HB	K	88.3
	F8	Mn-HB / Mg-HA		<b>(Ca*)</b>	93.9
SAN JAVIER	F1	Cu-HC / Zn-HC / Fe-HC / Ca-HA,HB,HC / Mn-HA,HC / <b>(Na-HC*)</b> / <b>(K-HB-HC*)</b> / <b>(P-HC*)</b>	Cu-HB	<b>(Mn*)</b>	19.0
	F2	Mg-HA / Zn-HA / Fe-HA / Cu-HA / <b>(Na-HA*)</b> / <b>(K-HA*)</b>	Mg-HA / Ca-HA,HB		35.3
	F3	Cu-HB / Fe-HB / Zn-HB / Mg-HB,HC <b>(Na-HB*)</b>	Zn-HB		49.5
	F4	P-HA	Zn-HA / K-HA / P-HA / <b>(Mg-HB*)</b>		60.0
	F5	P-HB	Mn-HA / P-HB / Fe-HA,HB		69.9
	F6		<b>(K-HB*)</b>	Na, Cu, <b>(K*)</b>	78.7
	F7			Zn, Mg, Ca, P	86.9
	F8	Mn-HB	Cu-HA-B		93.4
	F9		<b>(Mn-HB*)</b>	Fe	96.5

Cum. Var. corresponds to the cumulative variance percentage.

However, regardless of the cultivar, the elements Fe, Mn, Zn, and Cu had a particular distribution in the berries of some vineyards. Therefore, those elements could be potentially used as tracers of the spatial influence of geology, environment and agricultural practices at each vineyard, even at each plot (as shown in ternary graphs of Figure 7).

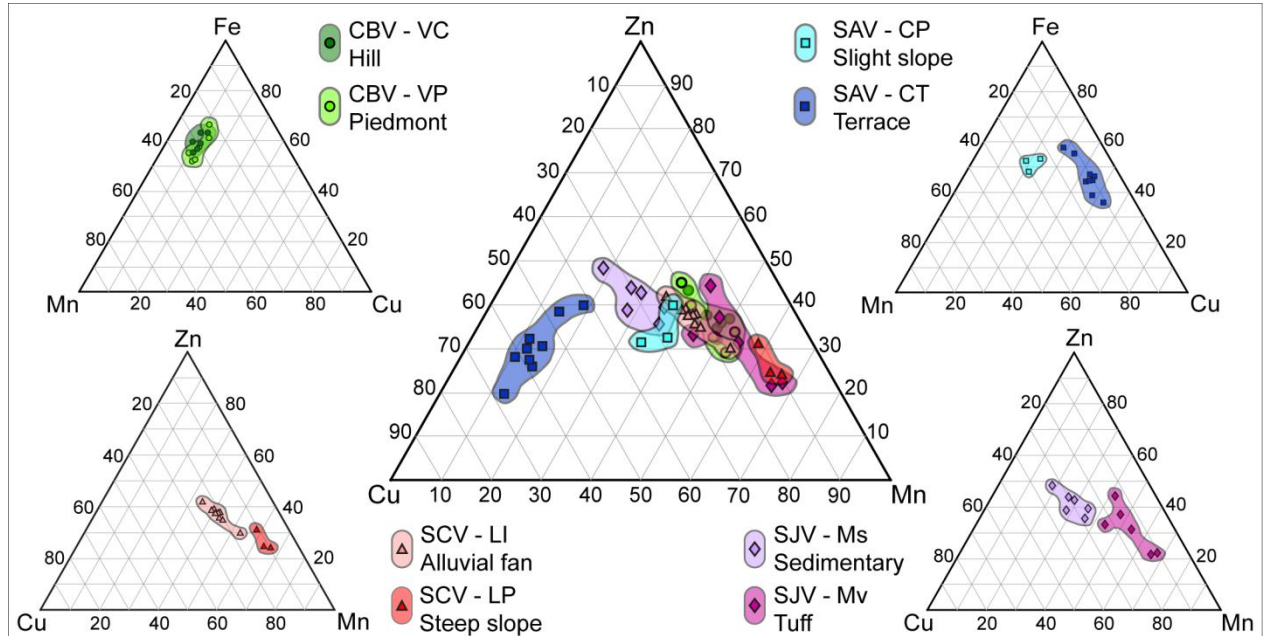


Fig. 7. Ternary graphs of Zn-Cu-Mn and Fe-Mn-Cu distinguish chemical composition of berries sampled at the different plots.

The same interpretation arose when considering “geo-pedological” mapping of plots (Fig. S1) together with the distribution of EMNs in the different matrices (whole soil, bioavailable phase, and fruits) at each sampled point and horizon (see Figs. S7 to S10). At CBV, the geochemical features of rocks or deposits that constitute the parent material (e.g. soil developed from aplitic parent rock in VC-9 pit), as well as the differential degree of anthropogenic intervention of soils in SAV (e.g. Terrace plot versus Slight slope plot in SAV) could be detected by the berry chemistry.

We also recognize that the elemental patterns in the soil profile were influenced by lithologic, pedogenetic, and/or environmental factors that characterize each vineyard, even by location of specific plots or by pits at a smaller scale. Therefore, detailed maps of the geology of parent material and the geochemical composition of plots could contribute to a better understand of the source of spatial variability related to nutrient content within the field at a local vineyard scale. This additionally could allow us to develop strategies for sustainable viticulture nutrient management.



We found that elevated contents of some elements in berries were highly correlated with the soil bioavailable phase and even with the content of whole soil (e.g. Fe in SCV and Cu and Zn in SAV). The latter raised the questions about what is the grapevine tolerance to over-accumulation of a metal in berries and what are the threshold values above which the grapevines are not able to avoid this over-accumulation. According to literature, high concentrations of metals such as Cu or Zn in fruit can alter both vinification procedures and wine quality (e.g. Jackson, 2014; Rogiers *et al.*, 2006), but most importantly can affect human health (Brunetto *et al.*, 2016; Komárek *et al.*, 2010). This constitutes a critical factor considering the bioaccumulative behavior of non-essential elements such as potentially contaminant metals (e.g. Funes Pinter *et al.*, 2017; Khan *et al.*, 2015).

Lastly, anthropogenic influences evaluated in the chemistry of irrigation water and rainwater identified high levels of Fe (related to airborne soil-dust input) and high contents of Cu and Zn in topsoil, which could be associated with the extensive use of agrochemicals (e.g. Brunetto *et al.*, 2016), as well as atmospheric pollution effects related to intensive industrial activity (e.g. Angelova *et al.*, 1999) that occurs mostly in the surrounding areas of the northern vineyards (CBV and SAV).

#### 4. CONCLUSIONS

The different geochemical reservoirs at each vineyard displayed unique nutrient elements patterns as a result of the interactions of their particular lithological, pedological, and environmental conditions, therefore nutrient interpretation should integrate all studied data to correctly and sustainably plan management practices.

We observed a strong influence of the soil geochemistry and the parent rock on the inorganic chemistry of berries. In most sites, the elements K, Na, Fe, Cu, and Mg showed a good correlation between berries and whole and/or bioavailable soil elemental composition, verifying the relevance of weathering process as a source of nutrients for vineyards. In berries, the elements Cu, Zn, Mn, and Fe had a specific behavior, which was strongly determined by the vineyard environment.

Higher contents of Cu and Zn in the irrigation and rainwater, with respect to groundwater, are most likely anthropogenic, revealing the fingerprint of both atmospheric pollutants and extensive agrochemical use. Although this influence could not be traced directly into the berries, at all the studied vineyards, these elements displayed increased soil bioavailability.

Knowing and understanding the geochemical properties of the parent material, rock texture, and mineralogical composition, may help us to develop an improved management of nutrients additions while considering the potential sources of weathering (i.e. avoiding the excessive use of fertilizers). It could also aid in the implementation of specific agricultural management strategies according to the particular characteristics of the cultivation site (e.g. promotion of deeper rooting systems).

The influence of geology on a regional, local and site scale impacts the physical, chemical and physicochemical conditions of the parent material-soil-plant interface. Therefore, it represents an additional aspect that should be considered in agriculture, particularly for viticulture, but also to environmental and ecosystem studies. Finally, this type of integrated and exploratory analyses allows for the interpretation of patterns and processes that may be occurring at the rock-soil-plant interface in managed agroecosystems, opening opportunities for applied and integrated mineralogical, geochemical, and biochemical studies.

## **5. ACKNOWLEDGMENTS**

This work was performed through the CORFO 12CTI-16788 Project financed by Government of Chile and the Consorcio I+D Vinos de Chile (Wines of Chile Research and Development Consortium). The latter institution participated in the first stage of project design and authorized the publication of this manuscript. The authors thank SGS Canada and Alan Mann for providing the MMI chemical analyses and scientific support. The corresponding author is grateful for the PhD scholarship financed by CONICYT and Brandon Schneider for English improvement.

## CAPÍTULO 7. CONTENIDO DE METALES EN SUELOS Y AGUAS

### 7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se estudia, de manera comparativa entre las cuatro viñas, la distribución de metales y metaloides en las matrices: roca, suelo total, fase biodisponible del suelo, agua de lluvia, agua de riego, agua de tranque y aguas subterráneas. El enfoque en los suelos se basa en reconocer diferencias en los contenidos de metales, en la química total y en la fase biodisponible, entre los suelos cultivados y los suelos no cultivados, con el fin de determinar la influencia de la actividad agrícola en la química de los suelos. Así mismo se comparan los contenidos de metales en las aguas que ingresan al sistema suelo (agua de lluvia y de riego) y las que efluyen del sistema (agua subterránea), con el fin de interpretar el origen y destino de estos elementos en las viñas. A nivel regional, el contraste de los contenidos de metales en suelos y aguas de las diferentes viñas permitirá reconocer parámetros medioambientales característicos de cada microcuenca de estudio.

Este capítulo, en conjunto con la discusión de los resultados de metales presentados en el Capítulo 4, tiene como objetivo aportar información para la respuesta de la primera pregunta científica planteada en esta tesis: ¿Cuál es la influencia relativa del material parental y de la actividad antrópica en las actuales condiciones de equilibrio del suelo?

### 7.2 ANÁLISIS DE DATOS

Los elementos analizados en el suelo corresponden a: Cu, Zn, Pb, Ni, As, Mo y Hg. En el agua se estudiarán los metales y metaloides: Zn, Cu, As, Cr, Sn y Mo, variables que fueron clasificadas con alta o moderada confiabilidad a través del control de calidad (Capítulo 4). Si bien, en la química total del suelo el Mo posee un error relativamente alto (26%) se considera que será aceptada debido a que es una variable de interés y su error es bajo en las otras matrices en estudio. Del mismo modo, Hg, que presenta alto error en las matrices de suelo total y biodisponible, es considerado dada su alta concentración en las muestras de la viña Santa Cruz. Por su parte, en la fase biodisponible As posee alto error (36%) en la temporada V15 y baja respuesta analítica en la temporada V16, sin embargo, esta variable será igualmente revisada para comparar con las matrices de suelo y agua.

Los datos de la química total y de la fase biodisponible de suelos serán analizados comparativamente entre las cuatro viñas en estudio utilizando la prueba no paramétrica Kruskal-

Wallis, con un 95% de confianza. Esta misma técnica se utiliza para comparar las diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de aguas subterráneas; para esta matriz se realizan dos pruebas una en que se comparan todas las muestras entre las cuatro viñas (cuatro poblaciones de datos) y una segunda en que se separan las muestras por las temporadas de invierno y verano para las cuatro viñas (ocho poblaciones). Además, dado el menor número de muestras de las matrices agua de lluvia, de riego y de tranque se realizan gráficos multielemento para comparar los patrones de distribución en las cuatro viñas. El último análisis realizado para las aguas, consiste en la normalización de las muestras de agua de lluvia por el promedio de las aguas subterráneas medidas en invierno 2015 y de las aguas de riego (promedios entre aguas de riego y agua de tranque) por el promedio de las aguas subterráneas del verano 2016 obteniendo las razones RW/GW-I15 e IW/GW-V16 respectivamente. Además para comparar las diferencias entre las muestras de aguas subterráneas muestreadas en invierno y verano se calcula la razón GW-I15/GW-V16. Estas razones se grafican en gráficos multielemento.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos para las muestras de frutos no serán considerados, puesto que en esta matriz los metales presentan una baja respuesta analítica. En las mediciones de la temporada V15, solo Zn y Cu fueron validados por el control de calidad y estos datos se trataron en el Capítulo 6, mientras que en la temporada V16 únicamente Cr posee suficiente grado de confianza a través del control de calidad, sin embargo, este metal tiene baja respuesta analítica en la fase biodisponible del suelo y alto error en la química de suelo, por lo tanto, no serán considerados en este capítulo.

## **7.3 COMPARACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES ENTRE VIÑAS**

### **7.3.1 METALES EN LA QUÍMICA DE SUELO TOTAL**

Los contenidos comparativos de metales en la química total de las cuatro viñas en estudio se presentan en la figura 7.1 y en la tabla A7.1 (Anexos). A partir de este ejercicio se puede comprobar que los suelos de San Antonio poseen contenidos estadísticamente superiores a los suelos de las otras viñas, en los metales y metaloides Zn, Cu, Ni, As y Pb, aunque estos dos últimos (As y Pb) son también significativamente altos en los suelos de San Javier. Por su parte, los metales Mo y Hg poseen las concentraciones estadísticamente más elevadas en los suelos de la viña de Santa Cruz, que corresponde a la viña con suelos cultivados de menor pH (más ácidos), durante la temporada de medición V15 (verano 2015).

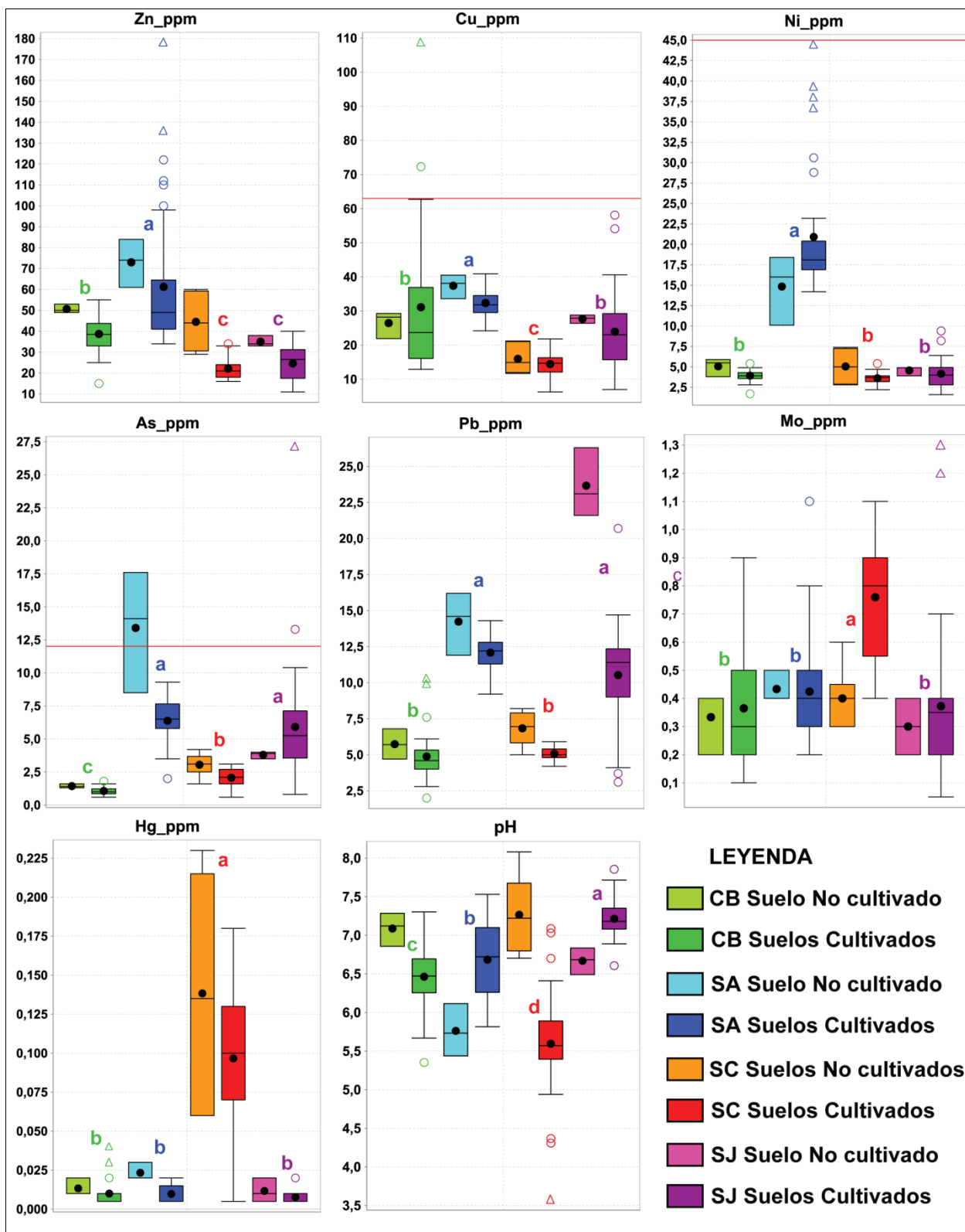


Figura 7.1 Gráficos de caja comparativos entre las cuatro viñas en estudio (CB: Casablanca; SA: San Antonio; SC: Santa Cruz; SJ: San Javier) con la distribución estadística de los metales Zn, Cu, Ni, As, Pb, Mo y Hg en la química total y de pH en los suelos no cultivados y cultivados. Letras sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ). Líneas rojas indican concentración límite para suelos según norma canadiense (CCME 2016).



Los contenidos significativamente más bajos de Zn lo presentan los suelos de Santa Cruz y San Javier, que corresponden a las viñas del sur. Para Cu las menores concentraciones se midieron en Santa Cruz. Para As se reconoce que Casablanca posee los contenidos estadísticamente inferiores, seguido por los suelos de Santa Cruz. Los menores valores de Pb también fueron registrados en Casablanca y Santa Cruz; estas dos viñas tienen en común un material parental de tipo granítico y por ende características mineralógicas y físicas muy similares.

Respecto a la relación entre los suelos cultivados y no cultivados, se comprueba que los metales Zn, Pb y Hg poseen mayores promedios en los suelos no cultivados en todas las viñas en estudio. Para los metales y metaloides Cu, Ni y As, se tiene que en la mayoría de las viñas, los valores promedios en los suelos no cultivados son superiores al de los suelos cultivados, con excepciones en algunas viñas, por ejemplo para Cu en Casablanca, Ni en San Antonio y As en San Javier. Por último, Mo posee valores menores o muy similares entre suelos cultivados y no cultivados, aunque en Santa Cruz los suelos cultivados presentan considerablemente mayores concentraciones de este metal.

En cuanto al pH de los suelos, en San Javier se miden los más altos pH (neutro), seguido por los suelos de San Antonio, luego los de Casablanca y, como ya fue mencionado, los más ácidos son los suelos de Santa Cruz. Luego, al contrastar entre suelos cultivados y no cultivados, se determina que en los suelos graníticos de las viñas Casablanca y Santa Cruz se miden pH más altos en los suelos no cultivados, por el contrario, en las viñas de San Antonio y San Javier, el pH es más ácido en los suelos no cultivados que en los suelos cultivados (Fig. 7.1).

### 7.3.2 METALES EN LA FASE BIODISPONIBLE DEL SUELO

Los valores promedios de metales en la fase biodisponible de los suelos no cultivados y de los suelos cultivados medidos en las temporadas de verano 2015 (V15) y 2016 (V16) se presentan en la figura 7.2 y en la tabla A7.2 (Anexos).

Al considerar la totalidad de los datos se tiene que, al igual que en la química total del suelo, los valores significativamente más altos de Ni se midieron en la viña de San Antonio, mientras que los mayores contenidos de Hg lo presentan los suelos de Santa Cruz. Por el contrario, a diferencia de lo que sucedía en la química total de suelo, los suelos de San Antonio muestran en la fase biodisponible los contenidos significativamente más bajos de Zn, As y Mo. En la fase biodisponible Mo muestra las concentraciones estadísticamente más elevadas en los suelos de Casablanca. Los mayores valores de Zn se reconocen en la viña de Santa Cruz, principalmente en la fase biodisponible de la temporada V15, aunque en Casablanca los valores de Zn son estadísticamente comparables, destacando que ambos suelos son de origen granítico.

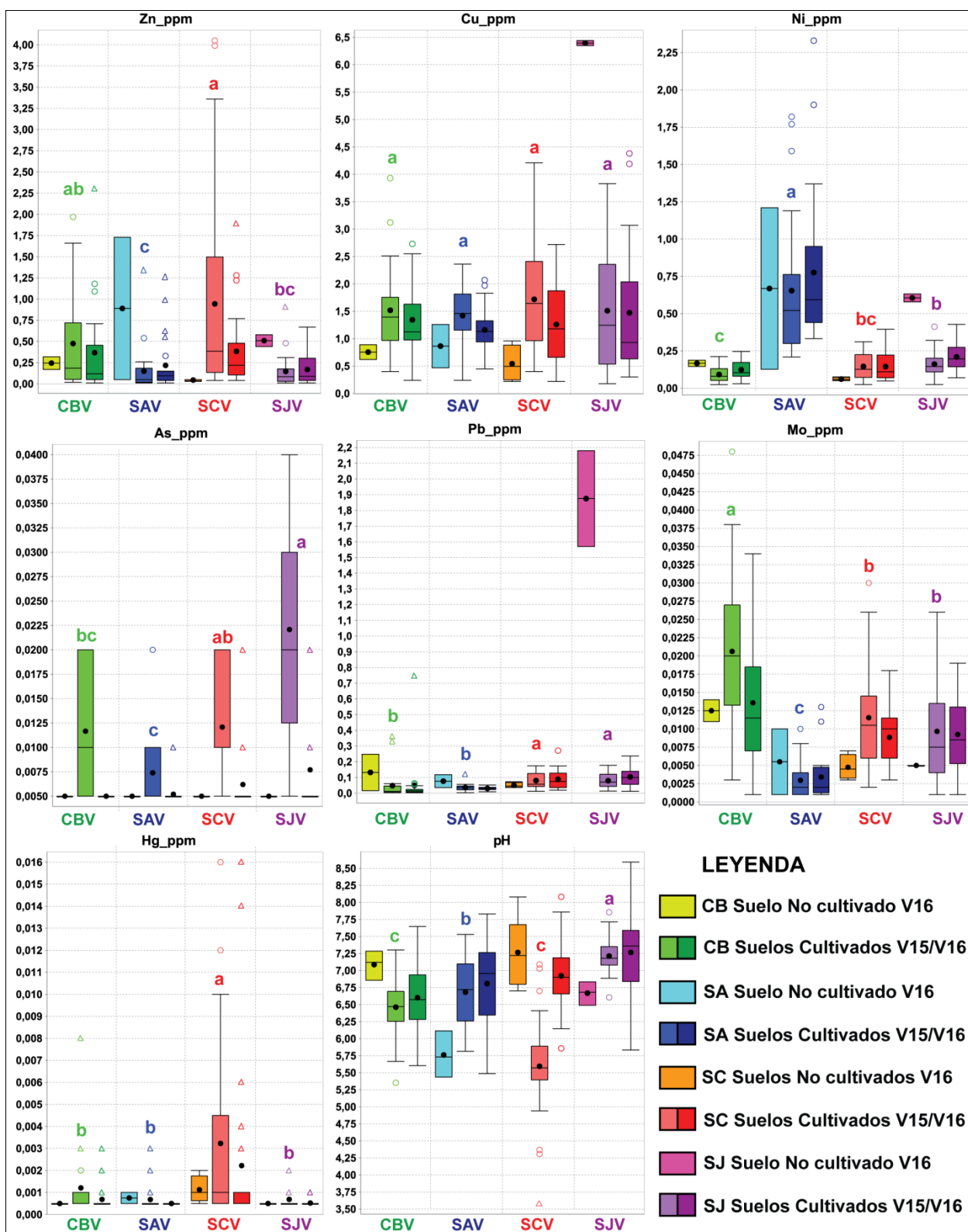


Figura 7.2 Gráficos de caja comparativos entre las cuatro viñas en estudio (CB: Casablanca; SA: San Antonio; SC: Santa Cruz; SJ: San Javier) con la distribución estadística de los metales Zn, Cu, Ni, As, Pb, Mo y Hg en la fase biodisponible y de pH de los suelos no cultivados y los suelos cultivados medidos en las temporadas V15 (Verano 2015) y V16 (Verano 2016). Letras sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

Los suelos de San Javier muestran las mayores concentraciones de As, pero éstas son comparables con los contenidos en la fase biodisponible de los suelos de Santa Cruz. El Pb biodisponible también es estadísticamente más elevado en las viñas del sur (San Javier y Santa Cruz). En cuanto a Cu biodisponible, éste es comparable en los suelos de las cuatro viñas.

Por otra parte, la comparación entre los suelos cultivados y no cultivados permite reconocer que esta relación varía para cada viña y cada metal. Esto puede depender de la movilidad de los elementos según el pH y de las propiedades texturales de los suelos, así como también de aspectos medioambientales existentes en la microcuenca en estudio y del manejo agrícola de cada viñedo.

En Casablanca el suelo no cultivado presenta un mayor pH que los suelos cultivados. Los metales Zn, Cu, Mo y Hg, de características levemente móviles a móviles en suelos (Amundson 2003), poseen valores medios más bajos en los suelos no cultivados, es decir que la biodisponibilidad de estos elementos está limitada por un pH neutro, aumentando en los suelos cultivados que presentan pHs más ácidos. Por el contrario, Pb y Ni que son elementos no móviles en suelos (Amundson 2003), tienen promedios mayores en la fase biodisponible de los suelos no cultivados y muy baja disponibilidad en suelos cultivados.

En San Antonio, el suelo no cultivado presenta un pH considerablemente más ácido que los suelos cultivados, en este caso, las concentraciones de los metales Zn, Pb, Mo y Hg, son más altas en los suelos no cultivados, mientras que Cu es más bajo en el suelo no cultivado y Ni muestra promedios relativamente similares en todos los suelos aunque considerando una alta desviación estándar en los datos.

En Santa Cruz se observa un notorio cambio en el pH de los suelos entre la temporada V15 (pH ácido) y la temporada V16 (pH neutro). Por su parte, los suelos no cultivados, tienen un pH medio levemente superior a los de la temporada V16 (Fig. 7.2), en este caso, los suelos cultivados poseen mayores concentraciones medias de Zn, Cu, Ni, Pb, Mo y Hg y los metales más móviles (Zn, Cu, Mo y Hg) poseen concentraciones más elevadas durante la temporada V15 (suelos ácidos).

Por último, en la viña de San Javier, los suelos no cultivados poseen un pH promedio menor al de los suelos cultivados; aquí los metales Zn, Ni, y sobre todo, Cu y Pb, registran contenidos medios considerablemente superiores en los suelos no cultivados (pH más ácido), respecto a los suelos cultivados, mientras que estos últimos poseen mayores valores medios de Mo y Hg.

Para el caso de As, se reconoce una baja respuesta analítica en la temporada V16, la cual puede corresponder a un error del laboratorio; dado a que las muestras de las calicatas blancos (suelo no cultivado) que se tomaron solamente en esa temporada, se registran todos los datos bajo el límite de detección, por lo tanto, no es posible reconocer la relación entre suelos cultivados y no cultivados.

### 7.3.3 METALES EN AGUAS

#### 7.3.3.1 *Contenidos medios en las distintas matrices de aguas*

Los gráficos multielemento con los contenidos medios de metales de las muestras de aguas de lluvia, de riego, de tranque y subterránea, se presentan en la figura 7.3. Además los resultados promedios para las cuatro viñas se pueden visualizar en la tabla A7.3 (Anexos).

El agua de lluvia de Casablanca, posee los valores más bajos en todos los metales, sólo con respuesta analítica para Zn, Cu y Pb. Al contrario, en el agua de lluvia de San Antonio, se registran las mayores concentraciones de Zn y Sn (Fig. 7.3A). En Santa Cruz, los contenidos de metales en las aguas lluvias no presenta valores extremos, respecto a las otras viñas, aunque se reconocen altos contenidos en Zn y Pb y, al igual que en Casablanca, no hay respuesta analítica en los metales y metaloides As, Ni, Sn y Mo. Las aguas de lluvia de San Javier muestran los más altos contenidos de Cu, Cr, Ni y Pb (Fig. 7.3A). Se destaca que Pb posee respuesta analítica en las aguas lluvias de todas las áreas de trabajo, mientras que en el resto de las matrices de agua, todos los datos están bajo el límite de detección. Además As y Mo, no tienen respuesta analítica para las aguas lluvia en ninguna de las microcuencas en estudio.

En cuanto al agua de tranque (Fig. 7.3B), en Casablanca se miden los mayores contenidos de Cu y Cr destacando que Cu es un orden de magnitud superior al resto de aguas de tranque, aunque con bajos contenidos de Zn, As y Ni. En San Antonio se reconocen las mayores concentraciones de Ni y Sn. Santa Cruz presenta la más elevada concentración de Sn, Mo y especialmente de As, sin respuesta para Ni. En el agua de acopio de San Javier se registra un valor muy alto de Zn, comparado con los otros tranques, pero los más bajos contenidos de Cu, Sn, Mo, Cr y Ni. Cabe mencionar que en Casablanca y en Santa Cruz el agua del tranque corresponde mayormente a agua subterránea, en San Antonio el tranque se ubica en una quebrada, por tanto, el origen del agua es mixta entre agua de escorrentía y agua subterránea, por el contrario, el agua de tranque de San Javier es de origen fluvial proveniente del canal Melozal.

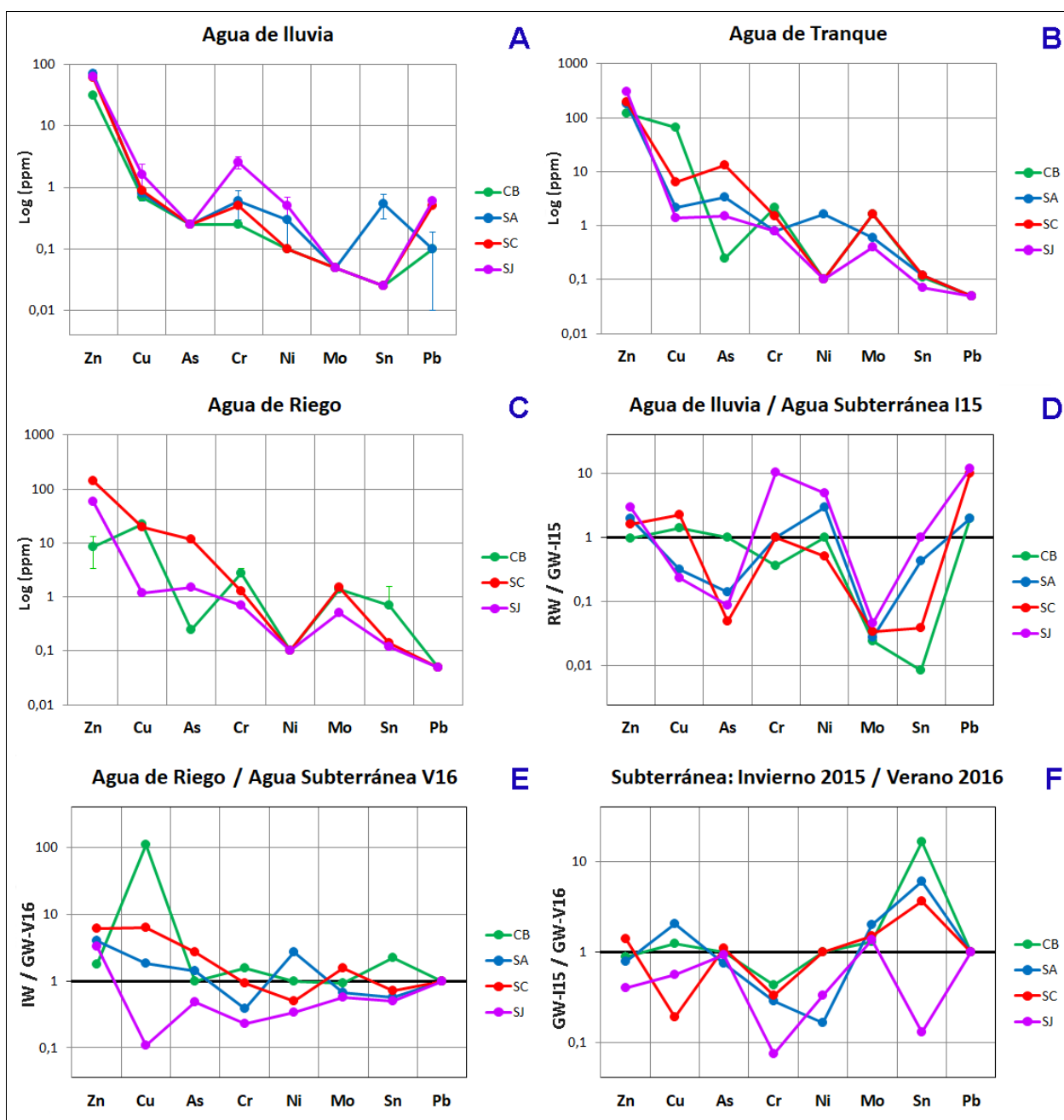


Fig. 7.3. Gráficos multielemento con los contenidos medios de los metales/metaloideos Zn, Cu, As, Cr, Ni, Mo, Sn y Pb en las viñas Casablanca (CB), San Antonio (SA), Santa Cruz (SC) y San Javier (SJ). Barras indican desviación estándar. (A) Agua de lluvia; (B) Agua de tranque; (C) Agua de riego; (D) Razón agua de lluvia/agua subterránea Invierno 2015 (RW/GW-I15); (E) Razón agua de riego/agua Verano 2016 (IW/GW-V16); (F) Razón aguas subterráneas de Invierno 2015/Verano 2016 (GW-I15/GW-V16).

Para las aguas de riego de Casablanca se presentan los mayores contenidos de Cu, Cr y Sn, además altos valores de Mo y los más bajos de Zn y As (Fig. 7.3C). En San Antonio, no se realiza riego durante el verano V16, por falta de agua en los pozos. En Santa Cruz el agua de riego posee los más elevados contenidos de Zn, As y Mo, pero también alta concentración de Cu y baja de Sn. Para el agua de riego de San Javier, se miden los más bajos valores de Cu,



Cr, Sn, Mo, además As es relativamente bajo, comparado con Santa Cruz. Sin embargo, se registraron altos contenidos de Zn, aunque menores que en Santa Cruz (Fig. 7.3C). Por su parte, Ni no tiene respuesta analítica en esta matriz.

Dado el mayor número de muestras obtenidas para las aguas subterráneas, es posible realizar un análisis estadístico de Kruskal-Wallis para comparar las diferencias estadísticamente significativas (Tabla A7.3; Anexos), en los contenidos de metales de las mediciones de invierno (I15) y verano (V16). A partir de la primera prueba (KW1), que considera en conjunto las aguas subterráneas de ambas temporadas, se reconoce que los contenidos de Zn, Cr, Mo y Sn son estadísticamente comparables entre las cuatro viñas, sin embargo, para Cu se establece que en la viña de San Javier las aguas subterráneas poseen valores estadísticamente mayores al resto de las viñas, mientras que en la viña de Casablanca las aguas subterráneas poseen las concentraciones más bajas de Cu y As (Fig. 7.4).

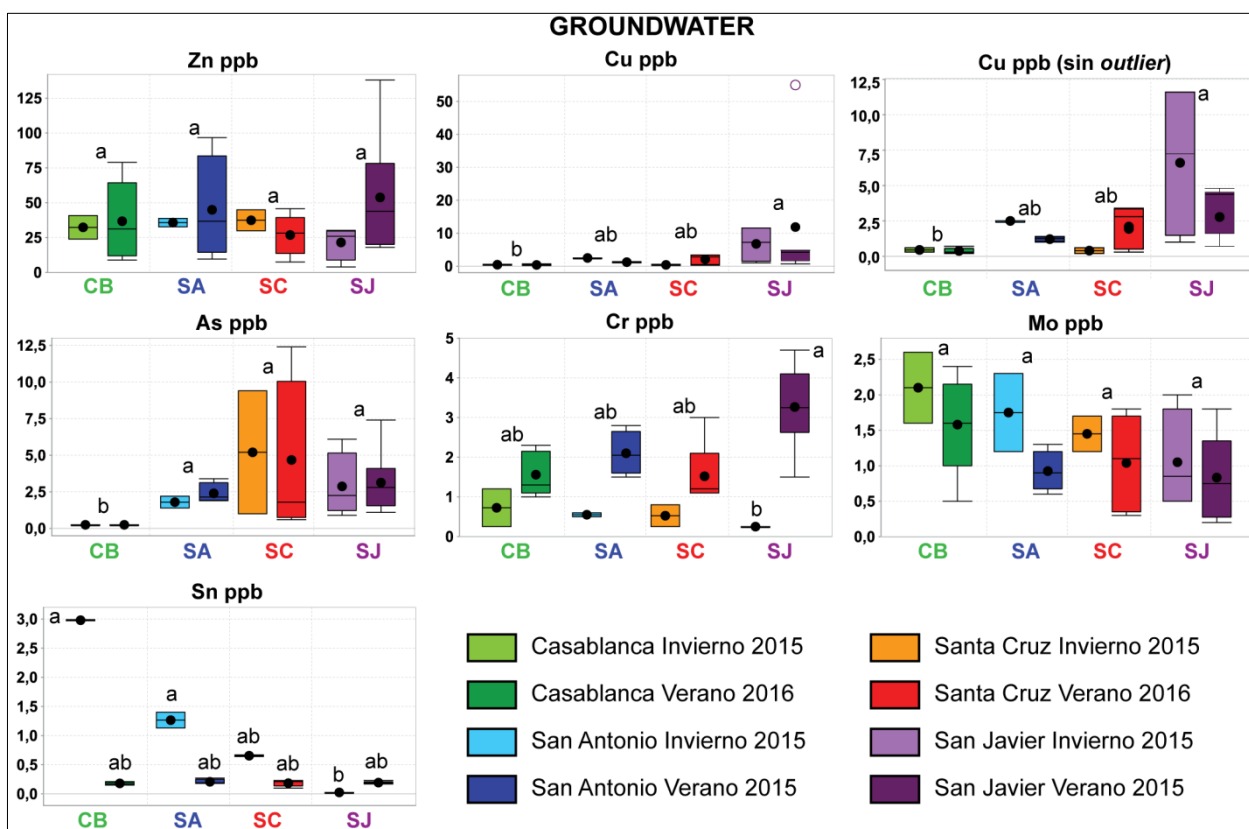


Figura 7.4. Gráficos de caja comparativos entre las viñas en estudio (CB: Casablanca; SA: San Antonio; SC: Santa Cruz; SJ: San Javier) con la distribución estadística de los metales y metaloides Zn, Cu, As, Cr, Mo y Sn en las aguas subterráneas medidas en las temporadas Invierno 2015 y Verano 2016. Letras sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

Mediante la segunda prueba de Kruskal-Wallis (KW2), que compara las mediciones de las cuatro viñas en las dos temporadas de medición por separado, se obtiene que los contenidos de los metales Zn, Cu y Mo medidos en invierno y en verano son similares para todas las viñas.

Por el contrario, se tiene que las aguas subterráneas medidas en verano en la viña de San Javier, poseen las mayores concentraciones de Cr y As, mientras que para Sn los contenidos estadísticamente mayores se miden en la temporada de invierno en las viñas del norte, en Casablanca y San Antonio. Arsénico posee las concentraciones estadísticamente menores en la viña de Casablanca durante la temporada de verano, lo mismo que para Cr y Sn en San Javier, durante la medición de invierno (Fig. 7.4).

### **7.3.3.2 Comparación entre las matrices de aguas**

Las razones RW/GW-I15, IW/GW-V16 y GW-I15/GW-V16 que permiten realizar una comparación de los contenidos promedio de metales entre las matrices de agua de lluvia (RW), agua de riego (IW) y aguas subterráneas (GW-I15 y GW-V16), se presentan en la tabla A4.7 (Anexos) y en las figuras 7.3D a 7.3F.

Las razones RW/GW-I15 indican que respecto a las aguas subterráneas muestreadas en la misma temporada (Invierno 2015), el agua de lluvia de la microcuenca de Casablanca presenta un leve enriquecimiento en los metales Cu y Pb, mientras que las aguas subterráneas poseen mayores contenidos en Mo y Sn (Fig. 7.3D). Para San Antonio se detecta que el agua lluvia, en relación al agua subterránea, tiene una mayor concentración de los metales Zn, Pb y sobre todo de Ni, con bajos valores en Cu, As, Mo y Sn. En Santa Cruz se reconocen razones superiores a 1 para los metales Zn y Cu y una razón RW/GW-I15=10 para Pb, con razones bajo 1 para Ni, As, Mo y Sn. Mientras que el agua de lluvia de San Javier muestra considerablemente altos valores, respecto al agua subterránea, en los metales Pb, Cr, Ni y Zn, y menores contenidos en Cu, As y Mo.

Por su parte, las aguas de riego de Casablanca muestran un importante enriquecimiento en Cu, respecto al agua subterránea, además razones IW/GW-V16 mayores a 1 son calculadas para los metales Sn, Cr y Zn. En San Antonio, el agua de riego (correspondiente únicamente al agua del tranque) está enriquecida en Zn, Ni, Cu y As, en relación al agua subterránea, a su vez presenta valores inferiores a 1 en los metales Cr, Mo y Sn. En las aguas de riego de Santa Cruz se reconocen razones mayores a 6 para los metales Zn y Cu y razones entre 3 a 1,5 para As y Mo, con razones menores a 1 para Ni y Sn. Por último, las aguas de riego de San Javier al ser contrastadas con las aguas subterráneas, presentan menores contenidos en todos los metales y metaloides, excepto en Zn (Fig. 7.3E).

Finalmente la comparación entre las aguas subterráneas medidas en invierno y en verano utilizando la razón GW-I15/GW-V16 (Fig. 7.3F), indican que en invierno las aguas de Casablanca poseen un mayor contenido de Sn y una baja concentración de Cr. Por su parte, en

la microcuenca de San Antonio, las aguas subterráneas muestreadas en invierno tienen contenidos superiores de Sn, Mo y Cu, que las aguas subterráneas medidas en verano, mientras que estas últimas están enriquecidas en Cr y Ni. En Santa Cruz las mayores diferencias entre ambas estaciones para las aguas subterráneas corresponden a una mayor concentración de Sn y leve de Zn y Mo en invierno, mientras que las aguas de verano poseen mayores valores de Cu y Cr. En San Javier, todos los metales muestran un enriquecimiento en verano, excepto por una leve mayor concentración en Mo, durante el invierno.

## 7.4 DISCUSIÓN

### 7.4.1 CONTENIDO DE METALES EN SUELOS CULTIVADOS Y NO CULTIVADOS

#### **7.4.1.1 Metales en la química total de suelos no cultivados**

A partir del análisis comparativo en la química total de suelos cultivados y no cultivados se reconoce que para todas las viñas estudiadas los suelos no cultivados presentan una mayor concentración en la mayoría de los metales, independiente del pH de los suelos y de la movilidad o comportamiento químico de los metales considerados. Esto podría estar indicando que la actividad agrícola genera un cambio en la química de los metales en el suelo, afectando su movilidad en el sistema y por ende su concentración. La degradación de la materia orgánica, el riego y/o la aplicación de agroquímicos, puede generar la disolución de fases inorgánicas u órgano-metálicas que inmovilizan a los metales en el suelo. Por esto, para el caso de los suelos cultivados, es posible que los metales tiendan a ser liberados, aumentando la lixiviación y migración hacia las aguas subterráneas. Otra explicación es que los metales podrían estar siendo fraccionados o absorbidos por las plantas, lo cual se corroboraría con un análisis químico en tejidos de la vid que tienden a acumular los metales, tales como hojas, raíces y/o corteza.

#### **7.4.1.2 Metales en la fase biodisponible**

En la fase biodisponible de los suelos se observa que las concentraciones de metales están relacionadas con el pH de éstos. Los suelos que presentan un menor pH tales como los suelos no cultivados de San Antonio y San Javier y los suelos cultivados de Casablanca y Santa Cruz, muestran un aumento en el contenido de ciertos metales. El elemento Zn sigue inequívocamente este patrón, otros elementos como Cu, Mo, Hg y Pb, siguen esta misma tendencia pero en casos puntuales presentan una distribución opuesta, esto indica que algunos metales tienen un comportamiento particular en algunas viñas, el cual puede responder a aspectos medioambientales o al manejo agrícola del viñedo, por tanto, es de interés el estudio

caso a caso. La influencia del pH en la biodisponibilidad de metales en los suelos es especialmente evidente en el caso de la viña de Santa Cruz, en que el contenido de metales como Zn, Cu, Mo y Hg, disminuye notoriamente desde la temporada Verano 2015 a la temporada Verano 2016, coincidente con un aumento de pH del suelo. En el resto de viñedos no se observan notorias diferencias entre temporadas.

## 7.4.2 DISTRIBUCIÓN DE METALES EN LAS VIÑAS EN ESTUDIO

### 7.4.2.1 Viña de Casablanca

Los suelos de Casablanca presentan contenidos de metales bajo la norma canadiense (CCME 2016), con excepción de algunos valores anómalos de Cu que corresponden a muestras obtenidas desde los suelos cultivados desarrollados sobre el dique aplítico (Fig. 4.9). Al ser contrastados con la roca, se reconoce un patrón similar entre la roca parental y la química total de los suelos, así como concentraciones sólo levemente superiores para los suelos, en la mayoría de los metales, evidenciando la mayor influencia del material parental en la química de éstos. No obstante, Cu muestra una alta concentración en relación a la roca, tanto en la química total de los suelos como en la fase biodisponible (Fig. 7.5A).

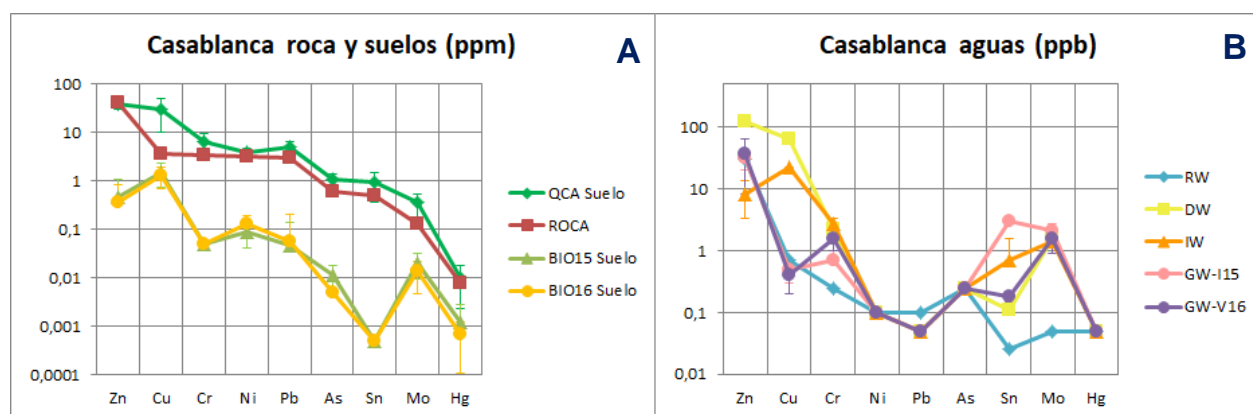


Figura 7.5. Patrones con contenidos medios de metales en las diferentes matrices de Casablanca. (A) Roca parental y suelos: química total (QCA Suelo) y fase biodisponible de las temporadas verano 2015 (BIO15 Suelo) y verano 2016 (BIO16 Suelo); (B) Aguas: lluvia (RW), tranque (DW), riego (IW) y subterráneas de las temporadas de invierno (GW-I15) y verano (GW-V16).

Por otra parte, en la comparación entre suelos cultivados y no cultivados se reconoce que en ambas fases del suelo (química total y biodisponible), los suelos cultivados poseen mayores promedios para este elemento. Por lo tanto, la influencia del manejo agrícola en los contenidos de Cu de los suelos cultivados se hace evidente además, dada la alta concentración de este metal, medida en el agua de tranque y en el agua de riego (Fig. 7.5B), los cuales son muy superiores a las aguas de lluvias y subterráneas (Fig. 7.4). Adicionalmente, Cu es el único de

los metales estudiados en esta viña que presenta mayor concentración en los suelos cultivados respecto a los no cultivados y sus mayores contenidos en la fase biodisponible se miden en los horizontes superficiales de la mayoría de las calicatas estudiadas (Fig. S7E; Anexos Capítulo 6), tal como se especificó en el Capítulo 6.

No obstante lo anterior, es importante notar que el promedio de Cu en la química total del suelo no cultivado (26,5 ppm) es igualmente superior al de la roca parental tonalítica (3,6 ppm) e incluso al de la aplita (9 ppm). Esto indicaría una acumulación natural de Cu en los suelos de esta área, el cual podría relacionarse también a un aporte eólico.

Finalmente, cabe destacar que a pesar de la notoria acumulación de Cu en los suelos de Casablanca, a nivel comparativo con otras viñas, los contenidos de este metal son menores a los reconocidos en San Antonio, estadísticamente comparables con los de San Javier y sólo mayores a los medidos en los suelos de Santa Cruz.

#### **7.4.2.2 Metales en la viña de San Antonio**

El contenido de metales y metaloides en la química total de los suelos de San Antonio es significativamente mayor para Zn, Cu, Ni, Pb y As, respecto a las otras viñas; la ocurrencia de estos metales tiene principalmente un origen litogénico, lo cual puede comprobarse por una clara similitud entre la concentración promedio de los metales en los suelos y en la química de la roca parental (Fig. 7.6A) y además porque los suelos no cultivados muestran mayores contenidos en todos los metales estudiados, excepto por Ni (Fig. 7.1).

Respecto a la norma canadiense (CCME 2016) los suelos no cultivados presentan valores de As que superan los límites establecidos de 12 ppm. Por otra parte, algunos valores anómalos de Ni en los suelos cultivados se acercan a los 45 ppm que tolera esta norma.

No obstante lo anterior, en la fase biodisponible del suelo, San Antonio sólo presenta los más elevados contenidos de Ni, respecto a las otras viñas, ya que por el contrario se reconoce que la biodisponibilidad de los metales y metaloides Zn, As y Mo fue la más baja de todas las áreas de estudio. Esto lleva a suponer que los metales están siendo retenidos en fases más estables del suelo, ya sea en complejos órgano-metálicos, óxidos de Fe-Mn o bien en espacios de la estructura cristalina de algunas arcillas que presentan una menor capacidad de intercambio catiónico; más aun considerando que en los suelos de San Antonio se registraron los mayores contenidos de materia orgánica y de esmectitas (probablemente montmorillonita), además de la existencia de nódulos de Fe-Mn.



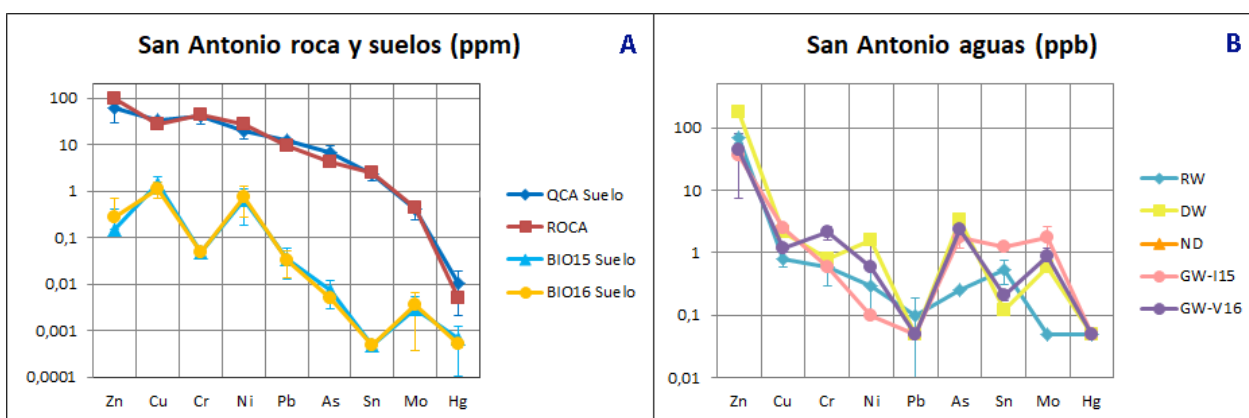


Figura 7.6. Patrones con contenidos medios de metales en las diferentes matrices de San Antonio. (A) Roca parental y suelos: química total (QCA Suelo) y fase biodisponible de las temporadas verano 2015 (BIO15 Suelo) y verano 2016 (BIO16 Suelo); (B) Aguas: lluvia (RW), tranque (DW) y subterráneas de las temporadas de invierno (GW-I15) y verano (GW-V16).

La alta biodisponibilidad de Ni, principalmente en los suelos cultivados del cuartel Pendiente (Fig. 4.35), podría eventualmente ser tóxica para las plantas. Es de interés en esta viña, estudiar la influencia de este metal en la respuesta fisiológica de las vides, puesto que la baja producción y bajo desarrollo de los racimos reconocidos en este viñedo podrían, en parte, ser causadas por la alta concentración de iones metálicos en el suelo; lo que en una primera etapa puede producir una reducción de la actividad fotosintética hasta, en casos más extremos, llevar a un colapso metabólico y muerte de la planta (Brunetto *et al.* 2016). Cabe destacar que el sector en que se ubica esta viña, podría existir una eventual contaminación atmosférica de Ni, dado altos contenidos de este metal medidos en el agua de lluvia y en el agua de tranque (Figs. 7.3A, 7.3B, 7.3D y 7.3E).

Otro elemento de interés en este viñedo es Cu, el cual también es más alto en la fase biodisponible de los suelos cultivados (Fig. 7.2); este metal posiblemente aplicado como fungicida a nivel foliar (directo en las hojas) muestra altas concentraciones en los frutos del cuartel Terraza (Fig. 4.36) y en la fase biodisponible de los suelos de este cuartel (Fig. 4.33), principalmente en las mediciones de la temporada verano de 2015.

#### 7.4.2.3 Metales en la viña de Santa Cruz

Los metales medidos en los suelos de Santa Cruz presentan todos los valores bajo la norma canadiense (CCMA 2016), sin embargo, el rasgo comparativamente más distintivo de los suelos en esta viña son los altos contenidos de Mo y Hg; además de los altos contenidos de As en las aguas subterráneas, de riego y de tranque.

En relación a los suelos de las otras viñas, Hg presenta una alta respuesta analítica en la mayoría de las muestras, tanto en la química total como en la fase biodisponible del suelo.

Además, en ambas fases medidas en el suelo, los contenidos de este metal son mayores en los suelos cultivados del cuartel Isla y durante la temporada V15 en que el suelo presenta un pH ácido (Fig. 7.2), aunque las concentraciones más elevadas se registran en los suelos no cultivados del cuartel Pendiente (Fig. 4.53). Sin embargo, esta alta acumulación de mercurio en los suelos no puede ser explicada por un origen litogénico, puesto que los valores de este metal en la roca parental (Capítulo 4) se encuentran bajo el límite de detección (Fig. 7.7A). Sin embargo, un origen antrópico o medioambiental tampoco es comprobable, puesto que las matrices de aguas no presentan respuesta analítica de este metal. Se propone que estudios de extracción secuencial sería de interés para evaluar la fase mineralógica u órgano-metálica, en que se encuentra secuestrado el Hg en el suelo, seguido de microanálisis de las fases minerales (ej. QEMSCAN, LA-ICPMS). Asimismo realizar campañas de terreno para muestreo y reconocimiento de afloramientos que puedan indicar el origen litológico de este elemento, ya sea en busca de vetas o vetillas con mineralización auríferas (reconocidas en este segmento de la Cordillera de la Costa) o bien rocas de origen volcánico.

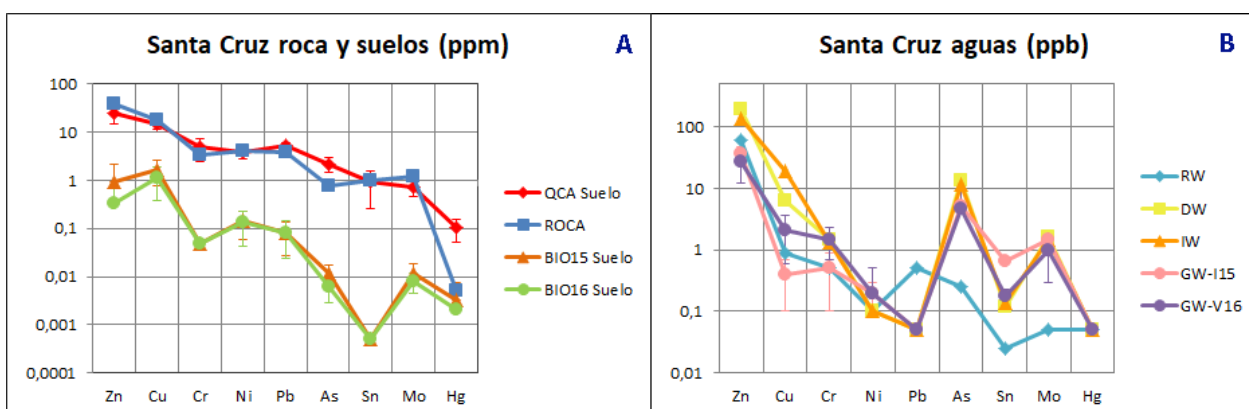


Figura 7.7. Patrones con contenidos medios de metales en las diferentes matrices de Santa Cruz. (A) Roca parental y suelos: química total (QCA Suelo) y fase biodisponible de las temporadas verano 2015 (BIO15 Suelo) y verano 2016 (BIO16 Suelo); (B) Aguas: lluvia (RW), tranque (DW), riego (IW) y subterráneas de las temporadas de invierno (GW-I15) y verano (GW-V16).

Adicionalmente, dada la anómala abundancia de Hg en los suelos de Santa Cruz se realizaron análisis específicos en los frutos de esta viña, registrando que las bayas poseen valores de Hg menores al límite de detección (<0,001 ppm).

Por otra parte, Mo muestra mayores concentraciones en los suelos cultivados, tanto en la química total como en la fase biodisponible y, en esta última, los valores son notoriamente superiores durante la temporada V15, en que las condiciones de pH del suelo son más ácidas. Esta situación no es lo esperable, puesto que la movilidad de Mo aumenta conforme aumenta el pH (Kabata-Pendias 2011), sin embargo, la disolución de fases que retienen al Mo, tales como óxidos de Fe-Mn y materia orgánica (Cumakov 1991) debido a la disminución del pH, podrían

augmentar la disponibilidad de este metal. Además, alguna influencia antrópica puede provenir por el riego, puesto que comparativamente con las otras viñas, las aguas de riego y de tranque de Santa Cruz muestran los mayores valores para este metal. Sin embargo, el contenido de Mo en la roca parental es mayor a los valores medios medidos en los suelos (Fig. 7.7A), sumado a altos valores en las aguas subterráneas (Fig. 7.7B), por lo tanto, un origen litológico no puede ser descartado.

Finalmente, al comparar los contenidos de As en los suelos y en la roca parental, se reconoce que los suelos están enriquecidos en este metaloide, esto puede responder a la alta concentración de As en las aguas subterráneas de esta microcuenca (Fig. 7.4), que impone altos contenidos en el agua de tranque y en el agua de riego (Figs. 7.3B y 7.3C). Sin embargo, un efecto de contaminación de este metal debido al manejo agrícola fue estudiado en viñas australianas, en donde se midió una alta movilidad de As (5 mg/poste/mes), desde postes de madera de pino impregnados con una mixtura de Cu, Cr y As, utilizados para sostener los sistemas de conducción en espaldera (Greven *et al.* 2007), modelaciones de estos autores indican que este arsénico puede migrar desde los postes hacia el suelo y hacia las aguas subterráneas, dependiendo principalmente la capacidad de suelo de adsorber este metaloide.

#### **7.4.2.4 Metales en la viña de San Javier**

Comparados con la roca, los suelos de San Javier presentan mayores concentraciones en los metales y metaloides Zn, Cu, Cr, Ni, Pb y As y considerablemente menores valores de Mo (Fig. 7.8A). Este enriquecimiento en los suelos, principalmente en aquellos de origen lacustre (Figs. 4.69 y 4.71), puede deberse a procesos de absorción o adsorción en materiales tales como materia orgánica, arcillas o nódulos de Fe-Mn, presente en todos los perfiles de suelo estudiados, pero además, al ingreso de sedimentos exógenos, transportados por procesos fluvio-aluviales al sistema lacustre, el que se reconoce en las calicatas ubicadas al noreste del cuartel en estudio. Un ejemplo de esto, en los suelos de San Javier, corresponde a dos valores anómalos que superan el límite establecido para As en la norma canadiense (CCME 2016), los cuales se registran en los suelos cultivados lacustres (Fig. 4.71) y se asocian a capas conglomerádicas.

Por otra parte, respecto a las otras viñas estudiadas, en los suelos de San Javier se midieron los mayores contenidos de As y Pb, tanto en la química total, como en la fase biodisponible, pero mientras que Pb muestra mayores valores en el suelo no cultivado, As posee las más elevadas concentraciones medias en los suelos cultivados, las cuales pueden estar fuertemente influenciados por los lentes de conglomerados, ya mencionados.

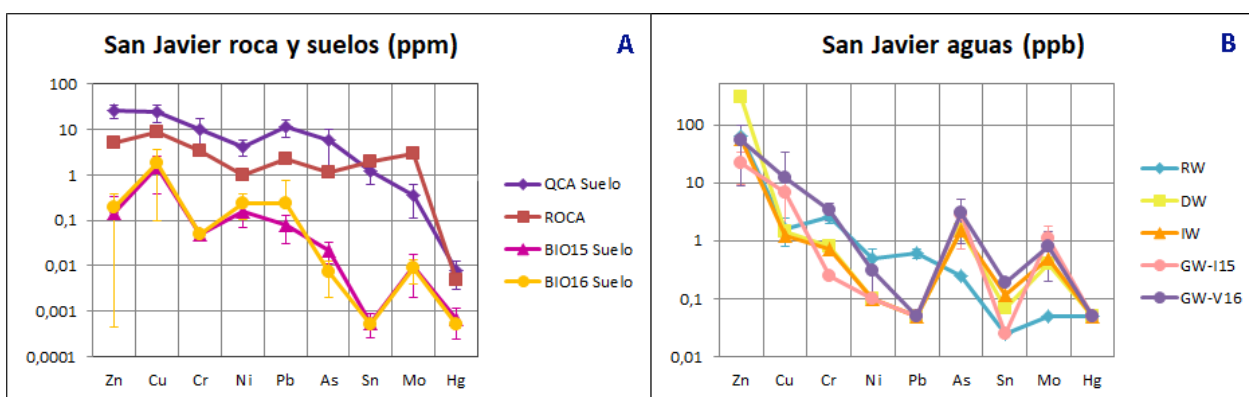


Figura 7.8. Patrones con contenidos medios de metales en las diferentes matrices de San Javier. (A) Roca parental y suelos: química total (QCA Suelo) y fase biodisponible de las temporadas verano 2015 (BIO15 Suelo) y verano 2016 (BIO16 Suelo); (B) Aguas: lluvia (RW), tranque (DW), riego (IW) y subterráneas de las temporadas de invierno (GW-115) y verano (GW-V16).

Otra característica que se destaca en San Javier, al comparar suelos cultivados y no cultivados, son contenidos considerablemente superiores en los suelos no cultivados de metales como Pb (en suelo total y en la fase biodisponible), Cu, Ni y Zn (principalmente en la fase biodisponible) y en menor medida Hg, en la química total. Esta condición puede explicarse por la elección de un perfil de suelo no cultivado correspondiente a una antigua zona cultivada, ya que estudios realizados por De Santiago-Martín *et al.* (2016) en viñedos abandonados, muestran elevados contenidos en química total y extractable de metales como Pb, Ni, Cd y Cu, los cuales se correlacionan con el tiempo transcurrido desde el abandono del terreno, con la nueva cobertura vegetal que lo coloniza y con propiedades del suelo.

Adicionalmente, los altos contenidos de los metales Cu, Ni, Pb y Cr que se concentran preferencialmente en los suelos no cultivados, pueden estar también influenciados por las elevadas concentraciones de estos metales medidas en el agua de lluvia de esta microcuenca, respecto a lo registrado en las otras áreas de estudio (Fig. 7.3A).

## CAPITULO 8. DISCUSIONES GENERALES

En este capítulo final se abordan aspectos de esta tesis que no fueron discutidos con suficiente detalle en los capítulos anteriores, los cuales corresponden a consideraciones metodológicas de la investigación y mineralogía de los suelos. En cada apartado se entregan recomendaciones para futuros estudios, a la vez que se generan comparaciones entre los diferentes sitios de trabajo.

### 8.1 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS

En este apartado se destacan y/o revisan críticamente algunos procedimientos metodológicos, concernientes a aspectos de diseño, muestreo y técnicas analíticas, con el objetivo de evaluar los principales resultados obtenidos y generar recomendaciones para futuros estudios de este tipo.

#### 8.1.1 LEVANTAMIENTO GEOLÓGICO

##### ***8.1.1.1 Geología a nivel de microcuenca***

El levantamiento geológico y geomorfológico, a escala 1:20.000, de la microcuenca en la que se emplaza cada viñedo, fue una técnica clave en el estudio geológico y medioambiental de viñedos, puesto que permite reconocer y caracterizar: a) las unidades litológicas (rocas o depósitos recientes) que conforman el material parental de los suelos del viñedo y del entorno mediato; b) el nivel base o *background* litogeoquímico que condiciona las propiedades físicas, mineralógicas y geoquímicas de los suelos; c) la disposición y capacidad relativa de los acuíferos presentes en la microcuenca; d) las condiciones geoquímicas de las rocas presentes en la microcuenca, los que determinan los procesos de interacción agua-roca.

##### ***8.1.1.2 Geología a nivel de cuartel***

El estudio geológico y pedogenético de cuarteles específicos de los viñedos, mediante calicatas dispuestas en una malla semi-regular, permitió delimitar e identificar variaciones espaciales de corto alcance del material parental. A partir del levantamiento de las unidades litológicas que componen el cuartel a una escala de detalle (1:5.000), se pudo comprobar que tal variabilidad condiciona aspectos texturales que impactan en el drenaje vertical y lateral de las aguas, lo cual influye en las condiciones fisicoquímicas y geoquímicas del suelo, principalmente en zonas de piedemonte, en dónde se intercalan depósitos recientes de diferente naturaleza y origen (ej.



coluviales, aluviales, de remoción en masa, fluviales, etc.). Asimismo en materiales parentales estratificados de origen sedimentario o volcánico, la intercalación de capas impone variaciones texturales y composicionales en el eje vertical del perfil de suelo. Por último, se corrobora que la presencia de contactos litológicos o la intrusión de diques generan diferencias composicionales que influyen notoriamente en la geoquímica y biodisponibilidad de elementos en los suelos, e incluso en la química de los frutos.

### **8.1.1.3 Hidrología e hidrogeología de la microcuenca**

La hidrogeología e hidrogeoquímica de la microcuenca integra los procesos de interacciones atmósfera-suelo-agua-roca. Según los resultados obtenidos en el estudio hidrogeológico (López 2018) y algunas evidencias en los suelos, se propone que estos procesos de interacción son modulados por, al menos, tres aspectos:

a) la geomorfología, que influye en las condiciones físicas y dinámicas del o de los acuíferos, reconociendo zonas de migración o flujo de aguas y otras de mayor a menor acumulación;

b) la composición química y mineralógica de suelos y de las rocas parentales, así como la química de aguas lluvias y aguas de riego (en sistemas cultivados), ya que tales componentes interactúan en procesos de meteorización química, formación y translocación de minerales secundarios y sustancias orgánicas, además de influir en la movilidad y concentración de elementos químicos en el suelo y en las aguas subterráneas;

c) la abundancia de agua, que determina los procesos de interacción agua-roca en los suelos, los cuales influyen fuertemente en las propiedades fisicoquímicas de estos últimos. Se observó que cambios en la abundancia de agua en los suelos modifica sus condiciones de pH y CE. Además influye en los procesos de interacción suelo-planta, lo cual se reconoció en Santa Cruz y San Javier, en que la migración preferencial de aguas por paleocanales provoca un aumento del vigor de la vegetación (natural y cultivada).

## **8.1.2 MONITOREO ESTACIONAL Y ANUAL DE VIÑEDOS**

### **8.1.2.1 Parámetros fisicoquímicos del suelo**

A partir de los estudios pilotos realizados fue posible reconocer un cambio en las condiciones fisicoquímicas del suelo, principalmente de los parámetros pH y conductividad eléctrica (CE) entre las estaciones invierno y verano en todos los viñedos (Fig. 8.1). Se propone que estas variaciones estacionales responden al grado de humedad y temperatura del suelo, es decir, tiene relación con aspectos climáticos. Esta variabilidad estacional no es considerada de

manera común en el ámbito agronómico, aun cuando puede tener repercusiones a nivel mineralógico y microbiológico, afectando a las condiciones de equilibrio del suelo e influyendo directamente en la disponibilidad de nutrientes, metales u otros elementos. De este modo, considerando la fuerte influencia que tiene el pH en las condiciones nutricionales del suelo, como recomendación aplicada a los cultivos, se propone que el monitoreo de estos parámetros (pH y CE), permitiría realizar un manejo agrícola de mayor eficiencia a lo largo de la temporada de cultivo.

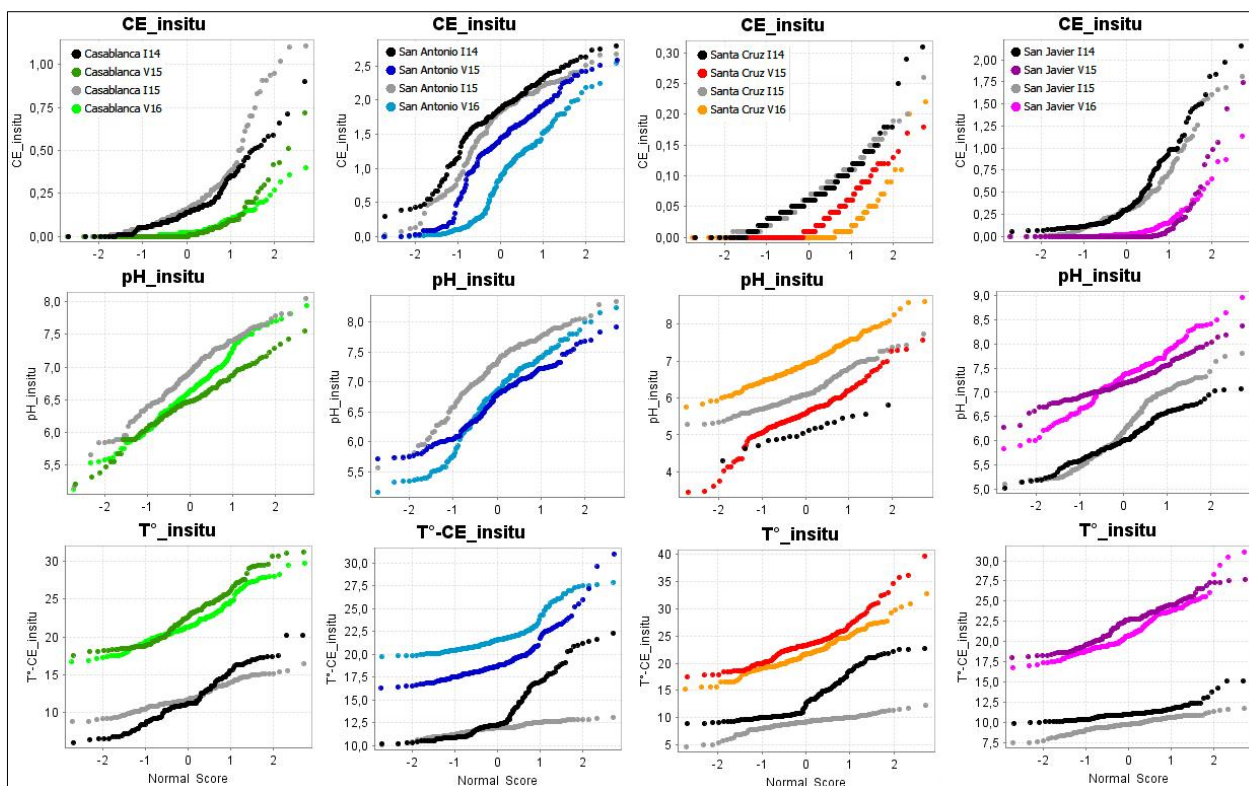


Figura 8.1. Gráficos de probabilidad acumulada con variaciones de CE, pH y  $T^{\circ}$  durante las cuatro estaciones de monitoreo: Invierno 2014 (I14), Verano 2015 (V15), Invierno 2015 (I15), Verano 2016 (V16), compilado para las cuatro viñas en estudio.

Estas mismas variaciones ocurren en las condiciones de Eh, sin embargo, las mediciones de esta variable fueron menos constantes y no entregan una tendencia clara, mientras en San Antonio y Santa Cruz el Eh es mayor en verano, en Casablanca hay una mayor dispersión de datos durante el invierno, con valores mayores, menores e iguales, a los recopilados en verano.

### 8.1.2.2 Fase biodisponible

El análisis de la fase biodisponible de los suelos mediante la técnica MMI tiene la ventaja de ser multielemento, a diferencia de los análisis agronómicos de rutina, en que se evalúa únicamente la disponibilidad de los principales macro y micronutrientes requeridos por las plantas. Este

método (MMI) permite evaluar la biodisponibilidad de metales, metaloides y otros elementos traza de forma conjunta y en bajas concentraciones, a nivel de partes por billón (ppb).

El monitoreo durante los veranos 2015 y 2016 permitió identificar algunas variaciones en los contenidos biodisponibles de nutrientes, metales y REE en el suelo en ambas temporadas. Tal fue el caso del viñedo de Santa Cruz, en que hubo un fuerte aumento en el pH desde el año 2015 al 2016, influyendo incluso en la química de las uvas en ambas temporadas. En base a esto se determina que la biodisponibilidad de elementos está fuertemente ligada a los cambios en las condiciones fisicoquímicas (especialmente de pH). De este modo, se estima que pueden existir considerables variaciones en el estatus de elementos biodisponibles entre la estación de invierno a la de verano, en las que se registraron aumentos de pH en verano en el caso de las viñas del sur, Santa Cruz y San Javier, y disminuciones de pH en las viñas del norte, Casablanca y San Antonio (Fig. 8.1). Por este motivo, para determinar la evolución dinámica de nutrientes, metales u otros elementos en la fase biodisponible del suelo, hubiese sido de interés monitorear la concentración en al menos tres estaciones: Invierno 2014-Verano 2015 que fueron estudios realizados en una misma calicata y luego comparar con lo que se obtuvo en el verano 2016, en que se trabajó en una calicata cercana.

### **8.1.3 EVALUACIÓN DE ACTIVIDAD ANTRÓPICA**

Para determinar el efecto que tiene el manejo agrícola y el medioambiente en la química de los suelos y frutos, se destacan los siguientes aspectos del diseño metodológico entre los más relevantes: a) la selección de uno a dos sectores no cultivados dentro de la misma viña, b) selección de dos viñas con similar litología, en este caso granitoides, c) el monitoreo fisicoquímico durante las cuatro estaciones, d) el muestreo durante dos veranos, e) muestreo de aguas lluvias, de riego, tranque y subterráneas, f) geología del entorno mediano e inmediato, g) comparación y contraste entre viñedos, cuarteles y calicatas, h) selección de un viñedo con manejo orgánico o biodinámico.

### **8.1.4 SELECCIÓN DE SUELOS NO CULTIVADOS**

La selección de suelos no cultivados fue valiosa para la comparación de propiedades del suelo, tanto químicas, físicas y mineralógicas, que pueden estar siendo alteradas producto de la actividad agrícola; aun cuando, la medición en calicatas blanco se implementó únicamente en la última temporada de muestreo (Verano 2016).

A partir de los análisis geoquímicos de suelo total y de la fase biodisponible, se determinó que la elección de los suelos blancos en Casablanca y Santa Cruz fue la correcta, sin embargo, en

San Antonio el suelo no cultivado presenta un material parental diferente al de las calicatas cultivadas, correspondiente a un conglomerado de origen fluvial, mientras que en los cuarteles en estudio se reconoce sólo localmente un estrato con conglomerados. En el caso de San Javier, si bien el suelo tiene el mismo material parental, la calicata blanco se ubica en una distancia significativa ( $\sim 1$  km) del cuartel en estudio, además es parte de una zona previamente cultivada (Fig. 5.11), aunque actualmente no presenta cultivos. Estas condiciones en los suelos no cultivados de San Antonio y San Javier pueden inducir variabilidad que no tiene directa relación con la influencia del manejo agrícola en las condiciones del suelo.

## 8.1.5 METODOLOGÍA ANALÍTICA

### 8.1.5.1 Análisis de aguas de lluvia

El análisis de la química de elementos mayores y traza (metales) en el agua es de alto interés por la implicancia que tiene la química de la atmósfera en la química del agua de lluvia y la influencia que ésta, a su vez, tiene en la fase biodisponible y en la química de los suelos. Si bien algunos estudios respecto a esa relación se han realizado en Chile, éstos son específicos para algunos elementos (Oyarzún *et al.* 2002; De Gregori *et al.* 2002) o propiedades fisicoquímicas (Villaseca 1983), con ausencia de trabajos a escala regional o de carácter multielemental como los datos colectados en esta tesis.

No obstante lo anterior, a partir del control de calidad de los datos se obtuvo que la confiabilidad de los resultados, al agregar los duplicados correspondientes a las muestras de aguas lluvias, disminuía notablemente (Tabla A4.3; Anexos). Por otra parte, se considera que para que los datos sean mejor validados se debió haber tomado un mayor número de muestras, por ejemplo instalar tres a cuatro colectores por viña y cada muestra de los colectores se debió tomar en duplicado. Sin embargo, como esta tesis estaba principalmente enfocada en las matrices suelo y frutos, se estimó suficiente el muestreo de aguas lluvias con solo dos colectores; cabe considerar que este tipo de muestreo es complejo, lo que puede inducir a un alto error de muestreo, tanto por el cuidado de no contaminar la muestra, como por el tiempo en que el colector debe ser dejado en el punto de muestreo a la espera de lluvias y la prontitud en que la muestra debe ser recolectada.

Los resultados obtenidos en esta tesis indican que Pb presenta respuesta analítica en todas las muestras de aguas lluvias, mientras que en el resto de matrices de aguas el Pb no es detectable. Particularmente, en la viña de Casablanca el contenido de Al, Cu y Pb es mayor en las aguas lluvias que en las aguas subterráneas (razón RW/GW > 1), lo mismo para Al, Ni, Zn y Pb en San Antonio; Pb, Zn y Cu en Santa Cruz y Cr, Pb, Ni, Fe y Zn en San Javier. Esta

información colectada es de importancia medioambiental, por tanto, una sistematización en el muestreo de aguas lluvias en la Zona Central de Chile es altamente recomendable, a modo de reconocer el nivel base de la química de esta matriz.

#### **8.1.5.2. Análisis de REE en aguas**

Para todas las matrices de aguas, las REE tienen una baja respuesta analítica y alto error analítico. Respecto al estudio de un sistema integrado, la falta de datos de estos elementos en la matriz agua, genera una pérdida de información, acerca de su dinámica en aguas de lluvias, de riego y subterráneas, las que podrían registrar reacciones de interacción agua-suelo-roca, tales como meteorización química, lixiviación y retención de elementos en fases estables del suelo.

#### **8.1.5.3 Análisis de metales y REE en frutos**

Las técnicas analíticas utilizadas en el estudio de la química de las bayas mostraron un correcto control de calidad en el análisis de macro y micronutrientes, sin embargo, para el análisis de metales los resultados estuvieron bajo el límite de detección prácticamente para la mayoría de estos elementos. Del mismo modo, no fue posible encontrar en el país un laboratorio que analizara en los frutos los elementos de las tierras raras (REE). Por este motivo, se considera relevante, que para estudios de este tipo, se debiera implementar una metodología analítica en un laboratorio nacional, que permita obtener una mejora en la resolución analítica de metales y REE.

## **8.2 MINERALOGÍA DE LOS SUELOS**

### **8.2.1 MINERALES DE ARCILLAS Y ASPECTOS ANALÍTICOS**

La formación de minerales de arcillas es un proceso regulado por la hidrólisis de silicatos, la cual es una de las reacciones más relevantes en el proceso de meteorización química, a su vez la formación de minerales de arcillas y su distribución en el frente de meteorización, o en el perfil de suelo, es un importante proceso pedogenético, el cual es dinámico y progresivo, en que los minerales de arcillas experimentan transformaciones y translocaciones, mediadas principalmente por aspectos climáticos y el tiempo.

Parte del proyecto que estructura esta tesis, consistió en determinar la influencia de la litología del material parental en la mineralogía de los suelos y, a su vez, intentar evaluar cambios mineralógicos inducidos por la actividad agrícola. Este último punto ha sido escasamente tratado en la literatura científica, en comparación con la influencia de la agricultura en otras



propiedades del suelo, tales como condiciones químicas, físicas o biológicas (Matocha *et al.* 2016). Sin embargo, aun cuando el trabajo realizado por Salgado (2019) fue efectivo en el reconocimiento de los minerales de arcillas en el suelo y su asociación con la mineralogía primaria del material parental, se determina que trabajos más específicos, utilizando técnicas químicas (extracciones secuenciales) y microanalíticas, serían necesarias para identificar y evidenciar la influencia del manejo agrícola en la mineralogía de los suelos.

## 8.2.2 MINERALOGÍA DE LA ROCA PARENTAL Y LOS SUELOS

### 8.2.2.1 Mineralogía de suelos y roca parental

Los suelos derivados de granitoides (Casablanca y Santa Cruz) presentan notorias similitudes mineralógicas. En primer lugar, la roca parental posee una mineralogía primaria análoga en que predominan las plagioclasas, cuarzo, feldespato potásico y actinolita, con clorita y epidota, que se presentan como minerales de alteración de hornblendas, biotitas y/o plagioclasas (sólo epidota), según la caracterización petrográfica (Contreras 2017), y con menores proporciones de caolinita e illita, determinada por difracción de rayos X (Salgado 2019). Los suelos muestran semejanza con la mineralogía de la roca, con un aumento de las proporciones de caolinita e illita, con existencia de vermiculita en Casablanca y vermiculita más esmectita en Santa Cruz y ausencia de clorita en los suelos, posiblemente por la formación de vermiculita (Wilson 2004). La vermiculita(-esmectita) disminuye en abundancia en los suelos cultivados respecto a los no cultivados, en ambas viñas, lo cual se puede relacionar con el aumento de la acidificación de los suelos (Wilson 2004) y/o a una intensificación en la tasa de meteorización.

Por otra parte, los suelos derivados de la Aplita muestran una mineralogía levemente diferente a los suelos provenientes de tonalita en Casablanca. En estos suelos existen bajas proporciones de feldespato potásico y actinolita, con mayor illita y menor caolinita que los suelos derivados directamente de tonalita, además en la fracción limo-arcilla del suelo, se reconocen zeolitas (laumontita y barrerita) y magnetita.

Las rocas parentales en San Antonio (arcosas) poseen alta proporción de plagioclasas y menor contenido de cuarzo, mientras que en los suelos se reconoce una disminución en la abundancia de plagioclasas y un aumento relativo de cuarzo. Además tanto rocas como suelos cultivados muestran diferencias entre los dos cuarteles considerados, por una parte el cuartel Terraza presenta illita y calcita con menores proporciones de clorita, actinolita y esmectita y con feldespato potásico sólo en una de las calicatas analizadas. Mientras que en el cuartel Pendiente se reconocen mayores proporciones de feldespato potásico, actinolita, caolinita y esmectita, con clorita y magnetita, en una de las calicatas, y ausencia de calcita e illita. Por otra

parte, en la fracción arcilla, no se reconoce illita en ninguna de las muestras, sólo en la calicata blanco, dominando arcillas como esmectita y caolinita. La presencia de illita en la fracción limo-arcilla en el cuartel Terraza, versus su ausencia en la fracción arcilla, podría corresponder a una de las propiedades de los “cristalitos” de illita de unirse y generar “macrodominios” (términos que se utilizan en micromorfología de suelos). Esto implicaría que la illita forma pequeños agregados que podrían llegar a tamaño limo, los cuales no pudieron ser desagregados mediante la separación de la fracción arcilla y, por tanto, no detectados. Por último, se destaca que la alta proporción de esmectita (posiblemente del tipo montmorillonita) y de la fracción arcilla en los suelos de San Antonio, impone propiedades particulares a estos suelos, los cuales serán tratados en el siguiente apartado.

Finalmente, la mineralogía de San Javier muestra una alta cantidad de fases de baja cristalinidad, evidenciado por el alto ruido en el difractograma, lo cual induce a una sobrestimación de las fases cristalinas reconocidas, esto ocurre tanto en la roca parental, como en el suelo. Este material corresponde a vidrio volcánico presente en la toba, mientras que en los suelos ocurre posiblemente como vidrio alterado o en etapa de alteración a las fases de menor cristalinidad, tales como alófanos e imogolitas, características de suelos volcánicos. La mineralogía de la roca, determinada por DRX, únicamente registra plagioclasas y menor contenido de cuarzo, sin embargo, en la fracción limo-arcilla de los suelos se reconocieron otros minerales tales como feldespato potásico, illita, zeolita (chabazita), caolinita, actinolita y epidota, esta última, observada también en el análisis petrográfico de la muestra de roca (Contreras 2017). Los suelos provenientes de depósitos lacustres muestran estos mismos minerales, sin presencia de zeolitas y con clorita en una calicata. Esta alta variabilidad de minerales en el suelo en comparación con la roca parental, podrían provenir de los aportes fluvioaluviales que se reconocen en esta microcuenca. Mineralógicamente, la mayor diferencia de los suelos no cultivados es el notorio predominio de cuarzo por sobre las plagioclasas, así como la ausencia de caolinita en la fase limo-arcilla. Esto también puede explicarse por aportes diferenciales de los sedimentos que se depositaron en del cuartel cultivado, distante 1 km del sector en que se localiza el suelo blanco (Fig. 5.11). Por otra parte, en la fase arcilla todos los suelos presentan esmectitas por sobre caolinita y menor illita, en los suelos cultivados la illita se presenta principalmente en el horizonte A de todas las calicatas, mientras que en el suelo no cultivado la illita se reconoce en los horizontes B y C. Se estima que sería de interés determinar si la illita en el horizonte A, pudiera ser una illita neoformada en base a una mayor disponibilidad de  $K^+$ , el cual puede estar siendo ingresado como fertilizante al suelo.

### 8.2.2.2 Evidencias de la mineralogía en la meteorización química

La mineralogía reconocida en suelos y contrastada con la petrografía de las rocas, indica que los suelos estudiados en las cuatro viñas son poco a medianamente evolucionados y el grado de meteorización es consistente con las condiciones climáticas actuales, según el Diagrama de Peltier (Fig. 8.2), lo que se determina por la alta persistencia en los suelos de minerales como plagioclasa y actinolita. Por otra parte la disminución en suelos cultivados de arcillas de bajo grado de meteorización, tales como vermiculitas, podría ser otro indicador del aceleramiento de las tasas de meteorización asociado a suelos cultivados, debido al manejo agrícola.

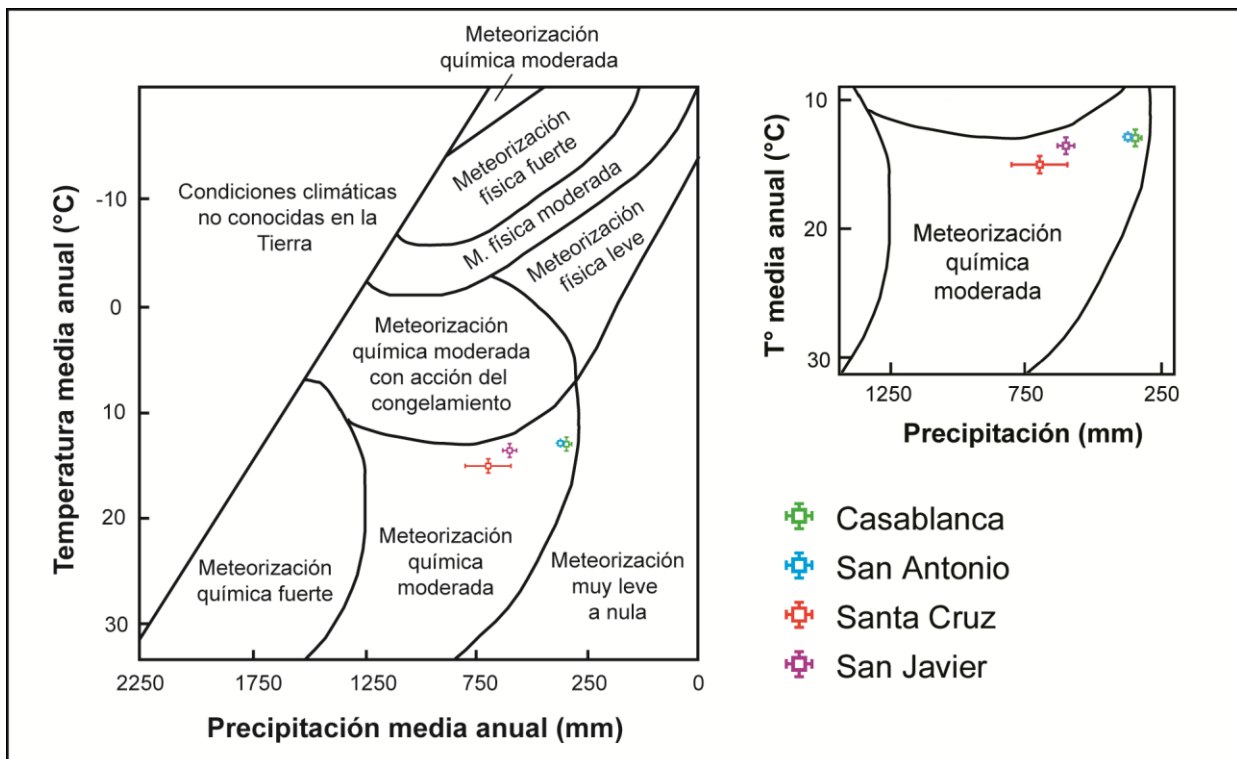


Figura 8.2. Diagrama Peltier (Peltier 1950) indicando temperaturas y precipitaciones medias anuales años 2014-2015 (Información de estaciones meteorológicas de DGA y Meteovid, Capítulo 3) y tasa de moderada meteorización química en todas las viñas. Imagen modificada de Marquez (2013).

## 8.2.3 INFLUENCIA DE LA MINERALOGÍA EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO

### 8.2.3.1 Influencia de la mineralogía en las condiciones fisicoquímicas del suelo

La comparación entre suelos cultivados y no cultivados, muestra notorias variaciones en las condiciones fisicoquímicas (principalmente pH y CE), observando además similitudes entre suelos de la misma litología. Tal es el caso de los suelos graníticos, que presentan un mayor pH en los suelos no cultivados (Tabla 8.1); por otra parte, los suelos de grano fino derivados de

secuencias sedimentarias en San Antonio y volcano-sedimentarias en San Javier muestran un aumento de pH en los suelos cultivados (Tabla 8.1).

Se hipotetiza que la mineralogía secundaria de los suelos puede estar controlando esta dinámica en el pH; los suelos graníticos de Casablanca y Santa Cruz, presentan un alto contenido de partículas tamaño arena (66,3 y 72,9%, respectivamente) y bajo porcentaje de arcillas (11,7 y 9,3%, respectivamente), las cuales corresponden a caolinita>illita>vermiculita(-esmeclitas). Estos suelos al ser más permeables sufren un mayor grado de lixiviación, la que es favorecida por el riego, lo cual genera una acidificación de los suelos cultivados, mientras que en zonas no cultivadas la lixiviación es más controlada, puesto que el sistema suelo está en condiciones de mayor equilibrio natural.

Tabla 8.1 Contenido de materia orgánica (MO), CIC, porcentaje relativo de arcilla, relación arcilla/arena, proporción semicuantificada de minerales de arcilla, pH y conductividad eléctrica (CE) del suelo, en las cuatro viñas diferenciando suelos cultivados y no cultivados. Valor superior y en negrita es promedio, inferior valores máximo y mínimo.

SUELOS	CASABLANCA		SAN ANTONIO		SANTA CRUZ		SAN JAVIER	
	CULT.	NO CULT.	CULT.	NO CULT.	CULT.	NO CULT.	CULT.	NO CULT.
MO (%)	<b>0,55</b>	<b>0,8</b>	<b>0,77</b>	<b>3,36</b>	<b>0,69</b>	<b>0,43</b>	<b>0,39</b>	<b>0,56</b>
	0,0-1,7	0,3-1,1	0,1-1,8	0,6-8,3	0,0-2,1	0,1-0,8	0,1-1,4	0,5-0,6
CIC (meq/100g)	<b>10,1</b>	<b>12,8</b>	<b>20,6</b>	<b>26,4</b>	<b>7,64</b>	<b>9,96</b>	<b>11,74</b>	<b>11,4</b>
	2,5-21,6	8,5-16,7	7,6-29,2	24,6-29,2	4,2-11,6	8,2-12,9	7,0-18,5	7,7-14,2
% Arcilla	<b>11,7</b>	<b>13,8</b>	<b>30,1</b>	<b>44,0</b>	<b>9,3</b>	<b>8,45</b>	<b>17,2</b>	<b>18,0</b>
	4,2-18,9	9,4-16,6	4,8-52,5	27,2-59,1	3,5-15,8	3,2-11,3	10,1-30,5	17,1-18,9
% arcilla/ % arena	<b>0,17</b>	<b>0,21</b>	<b>1,39</b>	<b>1,91</b>	<b>0,13</b>	<b>0,12</b>	<b>0,45</b>	<b>0,5</b>
	0,06-0,36	0,12-0,27	0,06-3,9	0,81-1,63	0,04-0,26	0,04-0,16	0,23-1,17	0,45-0,53
% illita	<b>3,1</b>	<b>2,5</b>	<b>0</b>	<b>4,0</b>	<b>2,1</b>	<b>1,4</b>	<b>0,7</b>	<b>1,1</b>
	0,0-6,3	1,5-3,2	0	0,0-6,1	0,5-3,8	0,4-1,8	0,0-3,0	0,0-1,8
% caolinita	<b>7,3</b>	<b>8,1</b>	<b>14,8</b>	<b>16,7</b>	<b>6,9</b>	<b>5,3</b>	<b>6,2</b>	<b>6,2</b>
	2,2-14,2	5,5-9,8	2,3-25,3	0,0-21,1	2,8-13,2	2,2-7,4	3,0-11,4	5,6-6,8
% esmeclita	<b>0,2</b>	<b>0</b>	<b>15,3</b>	<b>23,3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>10,6</b>	<b>10,7</b>
	0,0-2,8	0	2,1-28,7	0,0-45,6	0	0	5,6-16,1	10-11,2
% vermiculita	<b>0,6</b>	<b>3,2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	0,0-4,9	2,4-3,9	0	0	0,0-1,7	0,0-2,1	0	0
% esm+verm	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,8</b>	<b>1,2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	0	0	0	0	0,0-2,5	0,0-2,6	0	0
pH suelo	<b>6,35</b>	<b>7,1</b>	<b>6,68</b>	<b>5,76</b>	<b>5,59</b>	<b>7,27</b>	<b>7,21</b>	<b>6,67</b>
	5,4-7,1	6,9-7,3	5,8-7,5	5,4-6,1	3,6-7,1	6,7-8,1	6,6-7,9	6,5-6,8
CE suelo (mS/cm)	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>1,30</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,002</b>	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>
	0,0-0,09	0-0,03	0,08-2,5	0,02-0,07	0-0,12	0,0-0,01	0-1,18	0,01-0,03

Por el contrario, los suelos de grano fino poseen un alto porcentaje de arcilla (32,7% en San Antonio y 17,3% en San Javier), predominando las arcillas del tipo esmeclitas (probablemente

de tipo montmorillonita), por sobre la caolinita e illita. La montmorillonita al ser más receptiva a la absorción de agua y cationes (CIC: 80-150 cmol/kg; Yuan & Theng, 2012), respecto a las caolinitas (CIC: 3-15 cmol/kg; Yuan & Theng 2012), podrían interactuar y retener por más tiempo fertilizantes generando una alcalinización del sistema cultivado. Esto último debe ser corroborado con estudios específicos en otros suelos no cultivados en estas áreas, debido a que se reportó que la elección de los suelos no cultivados en las viñas de San Antonio y San Javier no fue la más adecuada.

### **8.2.3.2. Mineralogía de arcillas y su influencia en aspectos agronómicos del suelo**

Los suelos graníticos muestran arcillas de bajo grado de meteorización tales como vermiculita e illita (Weil & Brady 2017) aunque en baja proporción respecto a caolinita, que es la arcilla más abundante y con menor CIC. Esta configuración mineralógica es acorde con una baja capacidad de intercambio catiónico en los suelos, baja conductividad eléctrica y bajo contenido de materia orgánica (Tabla 8.1), además, como ya fue dicho, los suelos son altamente permeables, por el alto contenido de partículas tamaño arena en relación a las de tamaño arcilla.

En San Antonio, los suelos se presentan fuertemente agrietados en verano, en comparación con lo observado en invierno y además los suelos poseen una alta capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica, en relación con todos los suelos analizados en las otras viñas (Tabla 8.1). Estas propiedades provienen en gran parte por el mayor contenido de partículas tamaño arcilla, así como de la predominancia de esmectitas (montmorillonita). Estas arcillas tienen la capacidad de captar agua y otros cationes, generando procesos de hinchamiento y contracción, este proceso además del agrietamiento, puede generar una “estrangulación” de las raíces finas, lo que también puede influir en la baja producción de uvas que tiene esta viña. Otra propiedad que podría estar siendo controlado por las arcillas es el mayor promedio (tanto en suelos cultivados, como no cultivados) de materia orgánica, por la formación de agregados órgano-metálicos, que estabilizan a la materia orgánica en el suelo.

Estas propiedades pueden ser también observadas en San Javier, en que se reconocen algunos horizontes agrietados en verano, sin embargo, esto tiene menor ocurrencia que en San Antonio, probablemente porque en estos suelos predominan fases no cristalinas (alófanos e imogolitas), las cuales tienen una capacidad de intercambio catiónica que es dependiente del pH (Yuan & Theng 2012), con alta capacidad de adsorber fosfato y otros aniones en condiciones ácidas, menores a pH 5-6 (Weil & Brady, 2017); mientras que a pH 7, que es el pH medido en estos suelos, este material tiene una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC: 30-135 cmol/Kg; Kodama 2012), levemente inferior al de las montmorillonitas, pero con



considerablemente menores propiedades de plasticidad (Kodama 2012). Además el contenido total de partículas tamaño arcilla es menor al observado en San Antonio, con una relación arcilla/arena 1:2 en San Javier y cercana a 3:2 en San Antonio (Tabla 8.1).

En términos de producción de bayas y vinos de alta calidad, se espera que suelos con bajos contenidos de materia orgánica y una permeabilidad más eficiente, tal como los suelos reconocidos en Casablanca y Santa Cruz, generarán mejores condiciones para mantener a la planta en un estrés hídrico moderado, así como con un mayor control del vigor (crecimiento vegetativo). Estas condiciones permiten gatillar el metabolismo secundario en la planta, responsable de la generación de compuestos orgánicos como polifenoles, aromáticos y taninos, entre otros, responsables de propiedades como color, sabor y aroma (Ali *et al.* 2009).

## CAPITULO 9. CONCLUSIONES

1. En base a la primera pregunta científica planteada en esta tesis, respecto a la influencia relativa del material parental y de la actividad antrópica en las actuales condiciones de los sistemas suelo en estudio, se concluye que la geología del material parental, referida a su petrografía y geoquímica, así como también a las relaciones de contacto, en caso de suelos desarrollados directo sobre la roca. Además de la granulometría, el grado de consolidación, la estratigrafía y el potencial hidrogeológico, en suelos provenientes de depósitos o rocas estratificadas, son aspectos geológicos y geomorfológicos que son heredados a los suelos y que intervienen en sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

A partir de los datos mineralógicos, geoquímicos, fisicoquímicos, químicos y físicos analizados en esta investigación, se comprueba la influencia de la geología del material parental en las propiedades del suelo en diversos aspectos. Las principales interrelaciones observadas corresponden a:

- a) la textura del suelo es fuertemente influenciada por la mineralogía y granulometría (tamaño de grano) del material parental y por el grado de meteorización de éste,
- b) la mineralogía y geoquímica de los suelos es dependiente del material parental,
- c) la mineralogía primaria de los suelos determina en gran parte su mineralogía secundaria,
- d) algunos minerales de arcillas pueden influir en la abundancia de materia orgánica en los suelos e incidir en las condiciones fisicoquímicas de éste,
- e) en la química total del suelo, los patrones geoquímicos de la roca determinan a los patrones de REE y, parcialmente, a los patrones de nutrientes y metales.

Específicamente la comparación entre las rocas parentales y los suelos desarrollados, mostraron evidentes similitudes mineralógicas entre ambas matrices, con un notorio aumento de minerales de arcilla en todos los suelos estudiados. Algunas diferencias mineralógicas entre suelos y rocas en San Javier, podrían estar demostrando el aporte de sedimentos fluvio-aluviales durante la conformación del suelo.

En la geoquímica de las REE se observan similares patrones entre roca y suelo, con enriquecimientos o empobrecimientos, que no alteran de manera significativa este patrón, lo cual indica que este grupo de elementos es un buen trazador del origen litogénico, al menos en suelos poco evolucionados. Sin embargo, para suelos ubicados en una fuerte pendiente en la viña de Santa Cruz, se reconoce que el patrón de REE es modificado, con un empobrecimiento

preferencial de MREE y HREE, indicando la mayor movilidad de estos elementos y su lixiviación debido al flujo pendiente abajo de las aguas.

2. En cuanto a los efectos de la actividad antrópica en las actuales condiciones del suelo ésta pudo relacionarse a notorios enriquecimientos de algunos elementos químicos (principalmente nutrientes y metales) con respecto a la roca, además de cambios químicos y mineralógicos observados entre suelos cultivados y no cultivados, cambios en las propiedades fisicoquímicas y comparativamente elevadas concentraciones de algunos nutrientes y metales en la hidroquímica del agua de lluvia, riego y tranque.

Particularmente la comparación en la química total de nutrientes y metales entre las rocas parentales y suelos, muestran patrones diferentes en cada viña. En Casablanca se reconocieron similares patrones en nutrientes y metales, pero con notorio aumento de Cu en el suelo. Para este metal se ha interpretado un origen antrópico, dado sus altas concentraciones en las aguas de riego y de tranque.

La viña de San Antonio es la que posee los suelos con las más altas concentraciones en la mayoría de nutrientes y metales, sin embargo, los patrones y los contenidos de estos elementos son similares para todos los elementos entre la roca y los suelos, indicando un origen litogénico en la abundancia de éstos en los suelos, sin embargo, contenidos relativamente altos de Zn, Ni y Pb en las aguas de lluvia, respecto a las aguas subterráneas, podría responder a la contaminación atmosférica presente en una zona portuaria.

En Santa Cruz se reconoce un empobrecimiento del suelo en Ca y Mg, con enriquecimiento de Hg y As. Se concluye que para Hg no se puede descartar una fuente litogénica, aun cuando ésta no fue reconocida a través del levantamiento geológico. Por su parte, As podría tener un origen antrópico dada las altas concentraciones en las aguas de riego, tranque y subterráneas.

En la viña de San Javier existe un notorio enriquecimiento del suelo en casi todos los nutrientes y metales, con excepción de K, Mo, Sn y Hg, este enriquecimiento puede estar condicionado por aspectos pedogenéticos, no obstante, altos contenidos en aguas lluvias de Cu, Cr, Ni y Pb, supondría la ocurrencia de contaminación atmosférica en esta área, la cual podría influir en su acumulación en los suelos.

Por otra parte, la comparación de suelos cultivados y no cultivados, muestran el impacto del manejo agrícola a través de:

- a) Cambios en las condiciones de pH (acidificación de suelos cultivados graníticos de Casablanca y Santa Cruz y aumento de pH en los suelos cultivados ricos en arcillas de

- San Antonio y San Javier), además de aumentos progresivos en el pH medido durante las cuatro temporadas en los suelos de Santa Cruz, los que se asocian al encalamiento;
- b) Aumento de la conductividad eléctrica en los suelos cultivados el que puede responder al uso de agroquímicos;
  - c) Diferencias en la mineralogía, particularmente en la presencia de illita en el horizonte A de los suelos cultivados de San Javier, que podría implicar la neoformación de esta arcilla debido a una alta disponibilidad de K, producto del uso de fertilizantes.
  - d) Un patrón notoriamente enriquecido de REE en los suelos no cultivados de Casablanca, San Antonio y Santa Cruz.

3. En base a la segunda pregunta científica acerca de los procesos geoquímicos y pedogenéticos que están interactuando en los suelos, se interpreta la ocurrencia de procesos pedogenéticos, tales como translocaciones estacionales, lixiviación preferencial en zonas de pendientes fuertes y cursos paleocanales, formación y disolución de fases órgano-metálicas e interacciones con la biósfera (microorganismos y raíces). Por otra parte, se reconoce la formación de minerales secundarios como óxidos de Fe-Mn y minerales de arcillas.

A partir del análisis de la fase biodisponible del suelo se observa que los elementos tienen un comportamiento fuertemente influenciado por los procesos pedogenéticos y por el pH del suelo, con bajas concentraciones para Al, Fe y LREE, los cuales son retenidos en fases estables del suelo. Por el contrario, altos porcentajes de biodisponibilidad de elementos como Ca y Mg se asocian a la meteorización de silicatos, mientras que alta biodisponibilidad de Cu y Zn son relacionados a un origen exógeno al sistema suelo, ya sea por uso de agroquímicos o por aportes atmosféricos o eólicos.

Por último, diferencias en las condiciones de pH entre suelos cultivados y no cultivados en todas las viñas, bajos valores de REE totales en los suelos cultivados y la desaparición o disminución de vermiculita en suelos cultivados de Casablanca y Santa Cruz plantean la hipótesis de que el manejo agrícola generaría un aumento de la tasa de meteorización de los suelos, la cual podría ser testeada de manera específica en futuras investigaciones.

4. En cuanto a la tercera pregunta científica que plantea si la química de la planta es trazable con la química de la roca, suelos y aguas, se concluye a partir de esta investigación que cada microcuenca analizada tiene características particulares, esto se debe a que los procesos geomorfológicos e historia geológica, generan “microambientes” dentro de cada viñedo, los cuales desarrollan o experimentan un mesoclima único, que determina las interacciones biogeoquímicas y geoquímicas en el suelo y en el sistema suelo-planta.

Específicamente, al considerar la composición de las fases químicamente biodisponibles en el suelo, a una escala de calicata-planta, se obtuvo que éstas influyen considerablemente en la química de las frutas. A partir de un análisis de factores se comprobó que elementos como K y, en menor medida, Na, Fe, Cu y Mg tienen una buena correlación entre los suelos y la fruta en la mayoría de los viñedos, lo cual implica que altos contenidos de estos elementos en el suelo, imprimen altas concentraciones en las bayas. Debido a este aspecto, se advierte que concentraciones considerablemente altas de Cu en las bayas y suelos de San Antonio y de Fe en Santa Cruz, plantean el cuestionamiento acerca de la capacidad de la vid de reaccionar fisiológicamente a la sobreacumulación de un elemento potencialmente tóxico en el suelo, cuál es la concentración umbral de este elemento en el suelo que es tolerable para este tipo de plantas y cuánto de éste podría pasar eventualmente a la cadena alimenticia.

Adicionalmente, al comparar la composición de las bayas de las distintas viñas, se reconocen elementos químicos (K, N, P, Ca, S, Mg, Cl y Na) que se distribuyen como “elementos mayoritarios” en la fruta, con contenidos entre 2500 y 10 ppm, cuya acumulación en la baya está relacionado a procesos biológicos de la planta y tienen un comportamiento determinado según las diferentes cepas, específicamente Ca y Mg se concentran preferencialmente en las bayas del cv. Pinot Noir, mientras que K y S se acumulan en las bayas del cv. Carmenere. Por otra parte, los “elementos menores o traza” (Mn, Fe, Cu y Zn), cuya abundancia en el fruto no supera los 10 ppm, tienen un comportamiento particular en cada viñedo y su abundancia responde mayormente a la “geoquímica medioambiental del viñedo”, que involucra aspectos naturales y antrópicos.

Como “geoquímica medioambiental del viñedo” se define a la geoquímica determinada en la roca, suelo, fase biodisponible, agua de lluvia, agua de riego, agua de tranque y agua subterránea de cada viña, así como a los procesos geoquímicos y biogeoquímicos que condicionan al suelo, tales como meteorización, pedogénesis, lixiviación, acumulación o sobreacumulación de elementos químicos, los cuales ocurren en la interacción de los sistemas litósfera, hidrósfera, biosfera, atmósfera y antropósfera.

Finalmente, a partir del mapeo geo-pedogenético de calicatas se observó que las plantas a su vez responden a las características físicas de los suelos, los cuales están condicionados por aspectos geológicos, tales como ocurrencia de paleocauces en Santa Cruz o diferencias en el grado de consolidación de distintas capas en secuencias o depósitos estratificados de Casablanca, San Antonio y San Javier. Estas características influyen en aspectos como vigor de la planta, desarrollo de raíces, acceso a agua y nutrientes, entre otros, los que pueden influir en diversas características fenológicas, composicionales y organolépticas de las bayas.



5. Por último a modo de conclusiones generales y recomendaciones, se indica que en la perspectiva de un actual cambio climático, escasez de agua y creciente contaminación atmosférica, se plantea que el conocimiento de la geología y geoquímica del material parental, en conjunto con las propiedades físicas, químicas y mineralógicas del suelo, podría tener implicancias en cuanto al uso adecuado de fertilizantes y de agua, manejo agrícola de mayor precisión y selección de las variedades o portainjertos que mejor se adapten a las condiciones del suelo, con el fin de generar un consumo más eficiente de los recursos y minimizar el uso de agroquímicos.

A partir del diseño metodológico realizado en esta investigación se plantea que el levantamiento geológico, geomorfológico, hidrogeológico e hidrológico de una microcuenca, es una herramienta necesaria para abordar investigaciones de tipo medioambiental y estudios pedogenéticos de suelos.

Además, se reconoce al suelo como una matriz clave en los estudios de la zona crítica, impacto del cambio climático, concepto del antropoceno, geología ambiental, tasas de meteorización química, hidrogeoquímica, entre otros. Por lo tanto, el enfoque multidisciplinario entre las ciencias geológicas y las ciencias del suelo, es fundamental para entender integralmente los procesos exógenos que ocurren en el planeta, los cuales han determinado y determinan la existencia de vida en él.

## GLOSARIO

**Capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC):** Es la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar cationes. Corresponde a la suma total de los cationes intercambiables de un suelo y se expresa en miliequivalentes por cada 100 g de suelo seco (meq/100 g). Específicamente, cuanto mayor es la CIC mayor es la cantidad de cationes que el suelo puede retener.

**Cuartel:** Corresponde a un terreno delimitado, donde se plantan parras de la misma cepa o variedad en una misma temporada y, por tanto, son plantas de la misma edad. En cada cuartel se pueden usar prácticas agrícolas específicas. Dentro de una viña, un cuartel corresponde a un sector de plantación en que todas las plantas tienen una edad similar, son de la misma cepa y tienen un manejo agrícola común.

**Cultivar (cv.):** Término empleado especialmente en agronomía y que designa a la variedad cultivada. Es usado para aquellas poblaciones de plantas cultivadas que son genéticamente homogéneas y comparten características de relevancia agrícola, que permiten distinguir claramente a la población de las demás poblaciones de la misma especie (en este caso *Vitis vinífera* L.) y traspasan estas características de generación en generación, de forma sexual o asexual.

**Densidad aparente del suelo:** Se define como la masa de suelo por unidad de volumen ( $\text{g/cm}^3$  o  $\text{g/cc}$ ). Describe la compactación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso. La densidad aparente depende de la textura del suelo, el contenido de materia orgánica y el tipo arcillas que componen el suelo. Esta propiedad puede variar estacionalmente por efecto de las prácticas de laboreo y la humedad del suelo.

**Dosel:** Corresponde a la porción aérea de la planta de vid, está compuesto por parte del tronco, sarmientos, brotes, hojas, zarcillos y racimos, también se denomina canopia (del inglés canopy). En las hojas del dosel es donde se produce la captura del  $\text{CO}_2$ , la pérdida del vapor de agua, regulado por los estomas y donde se produce la fotosíntesis que transforma la energía de la luz solar en energía química. Además el dosel juega un papel muy importante en el microclima del racimo, el cual afecta el proceso de maduración de las bayas.

**Grados brix:** Es una calibración del índice de refracción de una solución, que mide los sólidos solubles, los cuales están mayormente conformados por azúcares. Este parámetro se usa comúnmente para evaluar el progreso en la maduración de la fruta en el campo y se considera

proporcional a su contenido de azúcar. Para medirlo se utiliza un refractómetro, el cuál puede ser un equipo portátil o de laboratorio.

**Mesoclima:** Se refiere al clima de un sitio o un viñedo particular y generalmente se restringe a un espacio de cientos de metros a varios kilómetros.

**Pinta (*Veraison*):** Estado fenológico de las bayas en que ocurren cambios en sus paredes celulares que acompañan el ablandamiento y marca el inicio de la síntesis de antocianos, los que le dan color a la baya, en el caso de los cultivares tintos.

**Plantas a pie franco:** Corresponden a plantas que no han sido injertadas a un sistema radical diferente (portainjerto). Por lo tanto, son una misma planta desde la raíz hasta el dosel.

**Portainjerto:** Denominado también patrón o pie, es la parte de la planta injertada que constituye su sistema radicular y parte del tronco, sobre el que se coloca una yema o púa de otra planta (variedad) para formar una vez injertado un solo individuo, el cual queda compuesto de dos individuos que genéticamente pueden ser diferentes.

**Textura del suelo:** Propiedad física del suelo, que indica la proporción (en porcentaje de peso) de las partículas menores a 2 mm de diámetro (arena, limo y arcilla) existentes en los horizontes del suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA, J. A., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S., FAZ, A., AROCENA, J. 2011.** Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soil on eight different parent materials. *Geoderma*. 161, 30-42.
- ALBANESE, S. 2008.** Evaluation of the bioavailability of potentially harmful elements in urban soils through ammonium acetate–EDTA extraction: a case study in southern Italy. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 8: 49–57.
- ALI, K., MALTESE, F., CHOI, Y.H., VERPOORTE, R. 2009.** Metabolic constituents of grapevine and grape-derived products. *Phytochemistry Reviews*, 9: 357-378.
- ÁLVAREZ, F. 2015.** Fuentes y reservorios de yodo natural y antropogénico en el Desierto de Atacama, Norte de Chile. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias mención Geología. Universidad de Chile. 145 pp.
- AMUNDSON, R. 2003.** Soil Formation. In: *Treatise on Geochemistry* (eds. Holland, H.D., Turekian, K.K.), Elsevier-Pergamon, Oxford. 5: 1-35.
- AMUNDSON R., JENNY H. 1991.** The place of humans in the state factor theory of ecosystems and their soils. *Soil Science* 151: 99-109.
- AMUNDSON, R., JENNY, H. 1997.** On a state factor model of ecosystems. *BioScience* 47: 536-543.
- AMUNDSON, R., RICHTER, D. D., HUMPHREYS, G., JOBBÁGY, E. G., GAILLARDET, J. 2007.** Coupling between biota and earth materials in the critical zone. *Elements* 3(5), 327-332.
- ANATIVIA, M.C. 1999.** Mapas de reconocimiento y mapas interpretativos de suelos de la VI Región de Chile. Tomo I y II. Memoria para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. 260 pp.
- ANDERSON, S. P., VON BLANCKENBURG, F., WHITE, A. 2007.** Physical and chemical controls on the Critical Zone. *Elements*. 3: 315-319.
- ANGELOVA, V. R., IVANOV, A. S., BRAIKOV, D. M. 1999.** Heavy metals (Pb, Cu, Zn and Cd) in the system soil – grapevine – grape. *J. Sci. Food Agric.* 79, 713-721.
- AQUILINA, L., POSZWA, A., WALTER, C., VERGNAUD, V., PIERSON-WICKMANN, A.C., RUIZ, L. 2012.** Long-term effects of high nitrogen loads on cation and carbon riverine export in agricultural catchments. *Environmental Science & Technology*, 46: 9447-9455.
- AQUILINA, L., MARÇAIS, J., DE DREUZY, J.R., LABASQUE, T., ABBOTT, B., VERGNAUD, V., WALTER, C., VIVILLE, D., CHABAUX, F., PINAY, G. 2017.** Acceleration of chemical weathering related to intensive agriculture: evidence from groundwater dating. *Geophysical Research Abstracts*, EGU General Assembly.
- ARNON, D. I., STOUT, P. R. 1939.** The essentiality of certain elements in minute quantity for plant with special reference to copper. *Plant Physiology*, 14(2): 371-375.
- AUGUSTIN, F., HOULE, D., GAGNON C., COURCHESNE, F. 2016.** Evaluation of three methods for estimating the weathering rates of base cations in forested catchments. *Catena*. 144: 1-40.

- BABECHUK, M.G., WIDDOWSON, M., KAMBER, B.S. 2014.** Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chemical Geology*, 363: 56-75.
- BAJARD, M., POULENARD, J., SABATIER, P., DEVELLE, A., GIGUET-COVEX, C., JACOB, J., CROUZET, C., DAVID, F., PIGNOL, C., ARNAUD, F. 2016.** Progressive and regressive soil evolution phases in the Anthropocene. *Catena*. 150: 39-52.
- BANWART, S.A., CHOROVER, J., GAILLARDET, J., SPARKS, D., WHITE, T., ANDERSON, S., AUFDENKAMPE, A., BERNASCONI, S., BRANTLEY, S.L, CHADWICK, O., DIETRICH, W.E., DUFFY, C., GOLDHABER, M., LEHNERT, K., NIKOLAIDIS, N.P, AND RAGNARSDOTTIR, K.V. 2013.** Sustaining earth's Critical Zone, Basic science and interdisciplinary solutions for global challenges. University of Sheffield, United Kingdom. 47 pp.
- BERNER, E. K., BERNER, R. A. 2012.** Global environment: water, air, and geochemical cycles. Second Edition, Princeton University Press.
- BERNER, E. K., BERNER, R. A., MOULTON K. L. 2003.** Plant and mineral weathering: Present and past. In: *Treatise on Geochemistry* (eds. Holland, H.D., Turekian, K.K.), Elsevier-Pergamon, Oxford. 5: 169-188.
- BERTOLDI, D., LARCHER, R., NICOLINI, G., BERTAMINI, M., CONCHERI, G. 2009.** Distribution of rare earth elements in *Vitis vinifera* L. "Chardonnay" berries. *Vitis*, 1: 49-51.
- BERTOLDI, D., LARCHER, N., BERTAMINI, M., OTTO, S., CONCHERI, G., NICOLINI, G. 2011.** Accumulation and distribution pattern of macro- and microelements and trace elements in *Vitis vinifera* L. cv. Chardonnay berries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 59: 7224-7236.
- BISCAYE, P. 1964.** Distinction between kaolinite and chlorite in recent sediments by X-ray diffraction. *Journal of Earth and Planetary Materials*. 49(9-10): 1281-1289.
- BRANTLEY, S., WHITE, T.S., WHITE, A.F., SPARKS, D., RICHTER, D., PREGITZER, K., DERRY, L., CHOROVER, J., CHADWICK, O., APRIL, R., ANDERSON, S., AMUNDSON, R. 2006.** Frontiers in exploration of the Critical Zone: Report of a workshop sponsored by the National Science Foundation (NSF), Newark, USA, 30 pp.
- BRANTLEY, S.L, GOLDHABER, M., RAGNARSDOTTIR, K.V. 2007.** Crossing disciplines and scales to understand the Critical Zone. *Elements*, 3: 307-314.
- BRANTLEY, S. L., MCDOWELL, W. H., DIETRICH, W. E., WHITE, T. S., KUMAR, P., ANDERSON, S. P., CHOROVER, J., LOHSE, K. A., BALES, R. C., RICHTER, D. D., GRANT, G., GAILLARDET, J. 2017.** Designing a network of critical zone observatories to explore the living skin of the terrestrial Earth. *Earth Surf. Dynam.*, 5, 841-860.
- BROADLEY, M., BROWN, P., CAKMAK, I., MA, J. F., RENGEL, Z., ZHAO, F. 2012.** Beneficial elements. In: *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (ed. Marschner, P.) Elsevier. 249-269.
- BRAUN, J., PAGEL, M., HERBILLON, A., ROSIN, C. 1993.** Mobilization and redistribution of REEs and thorium in a syenitic lateritic profile: A mass balance study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 4419-4434.



- BRIMHALL, G. H., DIETRICH, W.E. 1987.** Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: Results on weathering and pedogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 567–587.
- BRIOSCHI, L., STEINMANN, M., LUCOT, E., PIERRET, M.C., STILLE, P., PRUNIER, J., BADOT, P.M. 2013.** Transfer of rare earth elements (REE) from natural soil to plant systems: implications for the environmental availability of anthropogenic REE. *Plant and Soil*, 366: 143-163.
- BRUNETTO, G., AVELAR, P., WELLINGTON, G., CERETTA, C., TOSELLI, M. 2016.** Heavy metals in vineyards and orchard soils. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 39(2): 1-12.
- BRUNETTO, G., COMIN, J. J., MIOTTO, A., MORAIS, M. P., SETE, P. B., SCHMITT, D. E., GATIBONI, L. C., BASTOS DE MELO, G. W., MORAIS, G. P. 2017.** Copper and zinc accumulation, fractionation and migration in vineyard soils from Santa Catarina State, Brazil. *Bragantia*. 77(1), 141-151.
- CAMBROLLÉ, J., GARCÍA, J.L., FIGUEROA, M.E., CANTOS, M. 2015.** Evaluating wild grapevine tolerance to copper toxicity. *Chemosphere*, 120: 171-178.
- CASTILLO, P. 2012.** Análisis geoestadístico de geoquímica y organo geoquímica aplicado en exploraciones mineras. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias mención Geología, Universidad de Chile. 241 pp.
- CASTILLO, P., TOWNLEY, B., EMERY, X., PUIG, A., DECKART, K. 2015a.** Soil gas geochemical exploration in covered terrains of northern Chile: data processing techniques and interpretation of contrast anomalies. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 15: 222-233.
- CASTILLO, P., TOWNLEY, B., CONTRERAS, M., LÓPEZ, S., CORTÉS, E. 2015b.** Análisis geoquímico de suelos derivados de granitoides en los valles de Casablanca y Santa Cruz. XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena-Chile.
- CASTILLO-LAGOS, P., TOWNLEY, B., CONTRERAS, M., SERRA, I., FLORES, P., TURNER, N., MANN, A. 2016.** Rare earth elements (REE) geochemistry as tracers of pedogenetic processes and parent materials in viticultural soils from Central Chile. 1er Encuentro de jóvenes investigadores en Ciencias del Suelo. Valdivia-Chile.
- CASTILLO, P., TOWNLEY, B., LÓPEZ, S., SALGADO, P. 2017a.** Manual Metodológico para el estudio geológico-ambiental de viñedos (Versión 2). Informe Interno Proyecto CORFO Innova – Consorcio I+D Vinos de Chile. Santiago. 19 pp.
- CASTILLO, P., TOWNLEY, B., ABURTO, F. 2017b.** REE Distribution in cultivated and no cultivated soils in two viticultural areas of Central Chile: Mineralogical, Pedological and Anthropogenic influences. 2017 AGU Fall Meeting. New Orleans-USA.
- CCME. 1999.** Canadian water quality guidelines for the protection of agricultural water uses. <http://ceqg-rcqe.ccme.ca/en/index.html#void>.
- CCME. 2016.** Soil quality guidelines for the protection of environmental and human health. Canadian Council of Ministers of the Environment. Summary Table. <http://st-ts.ccme.ca/en/index.html>.

- CENSI, P., SAIANO, F., PISCIOTTA, A., TUZZOLINO, N. 2014.** Geochemical behavior of rare earths in *Vitis vinifera* grafted onto different rootstocks and growing on several soils. *Science of the Total Environment*, 473-474: 597-608.
- CHARRIER R., PINTO L., RODRÍGUEZ M. 2007.** Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *Geología de Chile*, Capítulo 3. 94 pp.
- CHOROVER, J., KRETZSCHMAR, R., GARCIA-PICHEL, F., SPARKS, D. L. 2007.** Soil biogeochemical processes within the Critical Zone. *Elements* 3(5), 321-326.
- CIREN. 1996.** Estudio Agrológico VI Región de O'Higgins. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Publicación CIREN N° 116. Centro de Información de Recursos Naturales. ISBN 956-7153-29-9. 371 pp.
- CIREN. 1997a.** Estudio Agrológico V Región de Valparaíso. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Publicación CIREN N° 114. Centro de Información de Recursos Naturales. ISBN 956-7153-20-5. 484 pp.
- CIREN. 1997b.** Estudio Agrológico VII Región del Maule. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Publicación CIREN N° 117. Centro de Información de Recursos Naturales. ISBN 956-7153-26-4. 611 pp.
- CIREN. 2010.** Estudio Agrológico Región de O'Higgins. Escala 1:10.000. Publicación CIREN N° 179. Centro de Información de Recursos Naturales. 570 pp.
- CIREN. 2016.** Estudio Agrológico Región de Valparaíso. Escala 1:10.000. Publicación CIREN N° 199. Centro de Información de Recursos Naturales. 400 pp.
- CNR. 1981.** Estudios de suelos del Proyecto Maipo. Escala 1:50.000. *Agrolog Chile Ltda.* Tomos I a IV. Comisión Nacional de Riego.
- CÓDIGO ALIMENTARIO ARGENTINO. 2017.** Ley 18284, Decreto 2126/1971. Capítulo 3, Artículo 156. De los productos alimenticios actualizado 10/2017. Ministerio de Salud de Argentina.
- COMPTON, J., WHITE, R., SMITH, M. 2003.** Rare earth element behavior in soils and salt pan sediments of a semiarid granitic terrain in the Western Cape, South Africa. *Chemical Geology*, 201: 239-255.
- CONDIE, K. C., DENGATE, J., CULLERS R. L. 1995.** Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59:2, 279-294.
- CONTRERAS, M., CASTILLO, P., LAGOS, F. 2014.** Mapas geológicos y geomorfológicos: Descripción de unidades petrográficas de las viñas de Casablanca, San Antonio, Santa Cruz y San Javier. Informe Interno Proyecto CORFO Innova – Consorcio I+D Vinos de Chile. Santiago. 24 pp.
- CONTRERAS, M., CASTILLO P., LAGOS, F., FARIÁS, M., TOWNLEY, B. 2015.** Geología y Petrografía de dos viñas en los valles vitícolas de Casablanca y Santa Cruz, Chile Central. XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena.
- CONTRERAS, M. 2017.** Estudio geológico, petrográfico y granulométrico del material parental de suelos vitivinícolas de la Zona Central de Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. 129 pp.

- COSIO, F., NEGRÓN, M., GASTÓ, J., VILLATE, J. L. 2007.** Distritos y sitios de la Provincia templada secoestival nubosa o Valparaíso: Secano de la Costa. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 7: 38-61.
- COTTON, W. 1998.** Geology and ore deposits of the Maqui Vein, Alhué Mining District, Coast Range of Central Chile. Thesis of Master of Science. Department of Geological Sciences, University of Colorado, 142 pp.
- CUMAKOV, A. 1991.** Chemical methods of microelement fractionation in soils, 4: Molybdenum. Slovenska Akademia Vied, Bratislava (CSFR). *Ustav Anorganickej Chemie*. 37-5: 419-425.
- D'ANTONE, C., PUNTURO, R., VACCARO, C. 2017.** Rare earth elements distribution in grapevine varieties grown on volcanic soils: an example from Mount Etna (Sicily, Italy). *Environmental Monitoring and Assessment*, 189: 160.
- DARRAH, P. R. 1993.** The rhizosphere and plant nutrition: a quantitative approach. *Plant and Soil*, 155/156: 1-20.
- DAVIS, J. 2002.** *Statistics and Data Analysis in Geology*, Third Edition. Wiley.
- DE GREGORI, I., LOBOS, M.G., PINOCHET, H. 2002.** Selenium and its redox speciation in rainwater from sites of Valparaíso region in Chile, impacted by mining activities of copper ores. *Water Research*, 36: 115-122.
- DE SANTIAGO-MARTÍN, A., VAQUERO-PEREA, C., VALVERDE-ASENJO, I., QUINTANA-NIETO, J.R., GONZÁLEZ-HUECAS, C., LAFUENTE, A.L., A, VÁZQUEZ DE LA CUEVA, A. 2016.** Impact of vineyard abandonment and natural recolonization on metal content and availability in Mediterranean soils. *Science of the Total Environment*, 551-552: 57-65.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A, ZUSSMAN, J. 1992.** *An Introduction to the rock-forming minerals*. Second Edition. John Wiley & Sons, New York. 696 pp.
- DERRY, L. A., CHADWICK, O. A. 2007.** Contributions from Earth's Atmosphere to soil. *Elements*, 3: 333-338.
- DGA. 2015.** Actualización de la modelación hidrogeológica de la cuenca del estero de Casablanca. Rizzo Associates Chile S.A. Dirección general de Aguas.
- DGA. 2016.** Meteorological Official Information years 2006 to 2015, Stations: Embalse Lliu-Lliu, Los Aromos, Quillota, Embalse Coihueco, Diguillín, Embalse Digua and Parral. Dirección General de Aguas, Gobierno de Chile. <http://snia.dga.cl>.
- DOUGLAS, T.A. 2006.** Seasonality of bedrock weathering chemistry and CO<sub>2</sub> consumption in a small watershed, the White River, Vermont. *Chemical Geology*, 231: 236-251.
- DÜRING, H., OGGIONNI, F. 1986.** Transpiration und Mineralstoffeinlagerung der Weinbeere. *Vitis* 25(2), 59-66.
- FABANI, M. P., TORO, M. E., VÁZQUEZ, F., DÍAZ, M. P., WUNDERLIN, D. A. 2009.** Differential absorption of metals from soil to diverse vine varieties from the Valley of Tulum (Argentina): Consequences to evaluate wine provenance. *J. Agric. Food Chem.* 57, 7409-7416.

**FAO, 2007.** Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO (IUSS GRUPO DE TRABAJO WRB), Roma.

**FARÍAS M. 2007.** Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile Central durante el Neógeno. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias mención Geología, Universidad de Chile. 236 pp.

**FERNÁNDEZ-CALVIÑO, D., PATEIRO-MOURE, M., NÓVOA-MUÑOZ, J. C., GARRIDO-RODRÍGUEZ, B., ARIAS-ESTÉVEZ, M. 2012.** Zinc distribution and acid–base mobilisation in vineyard soils and sediments. *Sci. Total Environ.* 414, 470-479.

**FERNÁNDEZ-CALVIÑO, D., PÉREZ-ARMADA, L., CUTILLAS-BARREIRO, L., PARADELO-NÚÑEZ, R., NÚÑEZ-DELGADO, A., FERNÁNDEZ-SANJURJO, M. J., ÁLCAREZ-RODRÍGUEZ, E., ARIAS-ESTÉVEZ, M. 2016.** Changes in Cd, Cu, Ni, Pb and Zn fractionation and liberation due to mussel Shell amendment on a mine soil. *Land Degrad. Dev.* 27, 1276-1285.

**FORTNER, S.K., LYONS, W.B., CAREY, A.E., SHIPITALO, M.J., WELCH, S.A., WELCH, K.A. 2012.** Silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption within agricultural landscapes, the Ohio-Tennessee River Basin, USA. *Biogeosciences*, 9: 941-955.

**FUENTEALBA, C. 2002.** Geología y mineralización de oro en el Distrito Minero Alhué, Cordillera de la Costa de Chile Central. Memoria de título de geólogo. Universidad de Chile. 86 pp.

**FUNES PINTER, I., SALOMON, M.V., GIL, R., MASTRANTONIO, L., BOTTINI, R., PICCOLI, P. 2017.** Arsenic and trace elements in soil, water, grapevine and onion in Jáchal, Argentina. *Science of the Total Environment*, 615:1485-1498.

**GAJARDO, R. 1994.** La vegetación Natural de Chile, clasificación y distribución Geográfica. Editorial Universitaria. 163 pp.

**GANÁ P., GUTIÉRREZ A., WALL R. 1996.** Mapa Geológico del área de Valparaíso-Curacaví, Regiones de Valparaíso y Metropolitana. Mapa Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería.

**GANÁ P., TOSDAL, R. 1996.** Geocronología U-Pb y K-Ar en intrusivos del Paleozoico y Mesozoico de la Cordillera de la Costa, Región de Valparaíso, Chile. *Revista Geológica de Chile.* 23(2): 151-164.

**GENG, A., ZHANG, S., HOILAND, H., 1998.** Complex behavior of trivalent rare earth elements by humic acids. *Journal of Environmental Sciences*, 10(3): 302–308.

**GODOY, E., RAYNER, N., DAVIS, B. 2006.** Edad U-Pb Cretácica temprana de ignimbritas y andesitas en la Depresión Central, VI Región, Chile: Implicancias geotectónicas. XI Congreso Geológico Chileno. Actas Vol. II: 229-232.

**GOLDSCHMIDT, V.M., 1958.** *Geochemistry.* Oxford University Press, Oxford, England. 730 pp

**GÓMEZ-ARMESTO, A., CARBALLEIRA-DÍAZ, J., PÉREZ-RODRÍGUEZ, P., FERNÁNDEZ-CALVIÑO, D., ARIAS-ESTÉVEZ, M., NÓVOA-MUÑOZ, J. C., ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ, E., FERNÁNDEZ-SANJURJO, M. J., NÚÑEZ-DELGADO, A. 2015.** Copper content and distribution in vineyard soils from Betanzos (A Coruña, Spain). *Span. J. Soil Sci.* 5(1), 60-71.

**GOOVAERTS, P. 1993.** Spatial orthogonality of the principal components computed from corregionalized variables. *Mathematical Geology*, 25(3): 281-302.

- GRAHAM, R. C., O'GEEN, A. T. 2010.** Soil mineralogy trends in California landscapes. *Geoderma*, 154(3-4), 418-437.
- GREVEN, M., GREEN, S. ROBINSON, B., CLOTHIER, B., VOGELER, I., AGNEW, R., NEAL, S., SIVAKUMARAN, D. 2007.** The impact of CCA-treated posts in vineyards on soils and ground water. *Water science & Technology*, 56(2): 161-168.
- GRUBER, N., GALLOWAY, J. N. 2008.** An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 451, 293-296.
- GUZMÁN, M.A., MANCISIDOR, M., SHARPE, J. 2016.** Pequeño Atlas Ilustrado del Río Tinguiririca. Junta de vigilancia Río Tinguiririca y Gobierno Regional del Libertador Bernardo O'Higgins. 54 pp.
- HAUSER A. 1995.** Hoja Talca, VII Región. Carta Hidrogeológica de Chile. Mapa Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- HAVLIN, J.L. 2005.** Fertility. In: *Encyclopedia of soils in the environment* (ed. Hillel, D). Columbia University, New York. 2: 10-19.
- HENDERSON, P. 1984.** Rare earth element geochemistry. *Developments in Geochemistry*, 2. Elsevier, Amsterdam. 510 pp.
- HERMANS, C., HAMMOND, J. P., WHITE, P. J., & VERBRUGGEN, N. 2006.** How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? *Trends in Plant Science*, 11(12): 610-617.
- HONG, H., FANG, Q., CHENG, L., WANG, CH., CHURCHMAN, G. J. 2016.** Microorganism-induced weathering of clay minerals in a hydromorphic soil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 184: 272-288.
- HU, Z., RICHTER, H., SPAROVEK, G., SCHNUG, E. 2004.** Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 27(1): 183-220.
- HU, Z., HANEKLAUS, S., SPAROVEK, G., SCHNUG, E. 2006.** Rare earth elements in soils, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(9-10): 1381-1420.
- INE. 2017.** Chilean Census 2017. Instituto Nacional de Estadísticas, Gobierno de Chile. <http://www.ine.cl>.
- JACKSON, R. S. 2014.** *Wine science: principles and applications*. Fourth Edition. Academic press. 960 pp.
- JANOTS, E., BERNIER, F., BRUNET, F., MUÑOZ, M., TRCERA, N., BERGER, A., LANSON, M. 2015.** Ce(III) and Ce(IV) (re)distribution and fractionation in a laterite profile from Madagascar: Insights from in situ XANES spectroscopy at the Ce L<sub>III</sub>-edge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 153: 134-148.
- JENNY, H. 1941.** *Factors of soil formation*. McGraw-Hill, New York. 281 pp.
- JENNY, H. 1980.** *Soil genesis with ecological perspectives*. Ecological Studies 37. Springer-Verlag, New York. 560 pp.
- JIN, L., RAVELLA, R., KETCHUM, B., BIERMAN, P.R., HEANEY, P., WHITE, T.S., BRANTLEY, S.L. 2010.** Mineral weathering and elemental transport during hillslope evolution at the Susquehanna/Shale Hills Critical Zone Observatory. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(13): 3669-3691.



- KABATA-PENDIAS, A. 2011.** Trace elements in soil and plants. CRCbPress, Taylor & Francis Group. 505 pp.
- KAISER, H. F. 1958.** The Varimax criterion for analytic rotation in Factor analysis. *Psychometrika*. 23: 187-200.
- KELLER, M. 2015.** The science of Grapevines: Anatomy and physiology. Second edition. Academic Press.
- KHAN, A., KHAN, S., KHAN, M.A., QAMAR, Z., WAQAS, M. 2015.** The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(18): 13772-99. doi: 10.1007/s11356-015-4881-0.
- KHAN, A.M., BAKAR, N.K., BAKAR, A.F., ASHRAF, M. 2016.** Chemical speciation and bioavailability of rare earth elements (REEs) in the ecosystem: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(29): 22764-22789.
- KODAMA, H. 2012.** Phyllosilicates. In *Handbook of Soil Science: Properties and processes*, Second Edition (Eds. Huang, P.M, Li, Y., Sumner, M.) CRC Press, Taylor & Francis Group. 1: 21.1-21.49.
- KOMÁREK, M., CADKOVÁ, E., CHRASNÝ, V., BORDAS, F., BOLLINGER, J.C. 2010.** Contamination of vineyard soils with fungicides: a review of environmental and toxicological aspects. *Environment International*, 36(1): 138-151.
- LAGOS, F. 2015.** Geomorfología del *terroir* en Malvilla y Tapihue, Región de Valparaíso, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Santiago. 50 pp.
- LARCHER, R., NICOLINI, G. 2008.** Elements and inorganic anions in winemaking: Analysis and applications. In: *Hyphenated Techniques in Grape and Wine Chemistry* (ed. Flamini, R), John Wiley & Sons. 289-333.
- LAVEUF, C., CORNU, S. 2009.** A review on the potentiality of rare earth elements to trace pedogenetic processes. *Geoderma*, 154: 1-12.
- LAVEUF, C., CORNU, S., JUILLOT, F. 2008.** Rare earth elements as tracers of pedogenetic processes. *C.R. Geoscience*, 340: 523-532.
- LE ROUX J.P. 2012.** A review of Tertiary climate changes in southern South America and the Antarctic Peninsula. Part 2: continental conditions. *Sedimentary Geology*. 247-248: 21-38.
- LÓPEZ, S. 2018.** Hidrogeología e hidrogeoquímica de aguas subterráneas en cuatro microcuencas de la Zona Central de Chile: Estudio aplicado al cultivo de la vid. Memoria para optar al grado de Magister en Ciencias mención Geología. Universidad de Chile. 243 pp.
- LUZIO, W. 2010.** Suelos de Chile. Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 364 pp.
- MA, L., JIN, L., BRANTLEY, S. 2011.** How mineralogy and slope aspect affect REE release and fractionation during shale weathering in the Susquehanna/Shale Hills Critical Zone Observatory. *Chemical Geology*, 290: 31-49.

- MANN, A.W. 2010.** Strong versus weak digestions: ligand-based soil extraction geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10: 17-26.
- MANN, A.W. 2012.** Vineyard nutrients at Brookwood Estate Margaret River, Western Australia. T3 SGS 1086 - CS52 ISSUED AUGUST 2012. 9 pp.
- MANN, A.W., CARITAT, P., PRINCE, P. 2012.** Bioavailability of nutrients in Australia from Mobile Metal Ion® analysis of catchment outlet sediment samples: continental-scale patterns and processes. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 12: 277-292.
- MANN, A.W., REIMANN, C., DE CARITAT, P., TURNER, N., BIRKE, M., GEMAS PROJECT TEAM. 2014.** Mobile Metal Ion® analysis of European agricultural soils: bioavailability, weathering, geogenic patterns and anthropogenic anomalies. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 15: 99-112.
- MARKERT, B., LI, Z.D. 1991.** Natural background concentrations of rare-earth elements in a forest ecosystem. *The Science of the Total Environment*, 103: 27-35.
- MARSCHNER, H. 1995.** Mineral Nutrition of Higher Plants. Second ed. Academic Press. 889 pp.
- MATOCHA, C., GROVE, J.H., KARATHANASIS, T., VANDIVIERE, M. 2016.** Changes in soil mineralogy due to nitrogen fertilization in an agroecosystem. *Geoderma*, 263: 176-184.
- MATSON, P.A., PARTON, W.J., POWER, A.G., SWIFT, M.J. 1997.** Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 277: 504-509.
- MARQUEZ, E. 2013.** Geochemical characterization of coal and mine rock waste samples from the region of Cam Pha in NE-Vietnam and their effect on rice paddy soil composition and toxic metal bioavailability. Thesis of Master of Science Geology (Major Geochemistry), Albert-Ludwigs Universitaet Freiburg, Germany. 140 pp.
- MCLENNAN, S.M., 1989.** Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy*, 21: 169–200.
- MIHAJLOVIC, J., BAURIEGEL, A., STÄRK, H.J., ROßKOPF, N., ZEITZ, J., MILBERT, G., RINKLEBE, J. 2019.** Rare earth elements in soil profiles of various ecosystems across Germany. *Applied Geochemistry*, 102: 197-217.
- MITIC, S., OBRADOVIC, M., MITIC, M., KOSTIC, D., PAVLOVIC, A., TOSIC, S., STOJKOVIC, M. 2012.** Elemental composition of various sour cherry and table grape cultivars using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry method (ICP-OES). *Food Anal. Methods*. 5, 279-286.
- MOLINA, M., ABURTO, F., CALDERÓN, R., CAZANGA, M., ESCUDEY, M. 2009.** Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: Phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination. *Soil Sediment Contam.* 18(4), 497-511.
- MONTES, C., PEREZ-QUEZADA, J.F., PEÑA-NEIRA, A., TONIETTO J. 2012.** Climatic potential for viticulture in Central Chile. *Australian Journal Grape Wine Research*, 18: 20-28.
- MORENO, H., VARELA, J. 1985.** Geología, volcanismo y sedimentos piroclásticos cuaternarios de la región central y sur de Chile. In: *Suelos volcánicos de Chile* (Ed. Tosso, J.). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 712 pp.

- MORGAN, J.B., CONNOLLY, E.L. 2013.** Plant-Soil Interactions: Nutrient Uptake. *Nature Education Knowledge*, 4(8): 2.
- MORRISSEY, J., GUERINOT, M. L. 2009.** Iron uptake and transport in plants: the good, the bad, and the ionome. *Chem. Rev.* 109(10), 4553-4567.
- MPODOZIS C., RAMOS V. 1989.** The Andes of Chile and Argentina. In *Geology of the Andes and its relation to Hydrocarbon and Mineral Resources*. In *Circumpacific Council for Energy and Mineral Resources* (eds. Ericksen, G.E., Cañas, M.T., Reinemund, J.A.). *Earth Science Series*, II: 59-90.
- MUNSEL. A.H. 1915.** *Atlas of the Munsell color system*. Wadsworth, Howland & Co., inc. Printers.
- NAKADA, R., TAKAHASHI, Y., TANIMIZU, M. 2013.** Isotopic and speciation study on cerium during its solid–water distribution with implication for Ce stable isotope as a paleo-redox proxy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 103: 49-62.
- NAHRWOLD, H. 2014.** *Vinos de Chile*. Segunda edición. Contrapunto. 284 pp.
- NESBITT, H. W., YOUNG, G. M. 1984.** Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 1523-1534.
- NICKEL, E. 1973.** Experimental dissolution of light and heavy-minerals in comparison with weathering and intrastratal solution. *Contributions to Sedimentology*, 1: 1–68.
- NORMA AGUA DE RIEGO. 1978.** Norma Chilena Oficial N° 1.333. Decreto Supremo del MOP N° 867/78. Gobierno de Chile.
- OK, Y. S., LIM, J. E., MOON, D. H. 2011.** Stabilization of Pb and Cd contaminated soils and soil quality improvements using waste oyster shells. *Environ. Geochem. Health*. 33, 83-91.
- ORESCANIN, V., KATUNAR, A., KUTLE, A., VALKOVIC, V. 2003.** Heavy metals in soil, grape, and wine. *J. Trace Microprobe Tech.* 21(1), 171-180.
- OYARZUN C., GODOY, R., LEIVA, S. 2002.** Depositación atmosférica de nitrógeno en un transecto valle longitudinal-cordillera de Los Andes, centro-sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 72: 233-243.
- PACES T. 1991.** Changes in rates of weathering and erosion induced by acid emissions and agriculture in Central Europe. In: *Land Use Changes in Europe* (eds. Brouwer F.M., Thomas A.J., Chadwick M.J.). *The GeoJournal Library*, 18. Springer, Dordrecht. 528 pp.
- PANG, X., LI, D.C., PENG, A. 2002.** Application of rare-earth elements in the agriculture of China and its environmental behavior in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 9: 143-148.
- PAWLIK, L., PHILLIPS, J. D., ŠAMONIL, P. 2016.** Roots, rock, and regolith: Biomechanical and biochemical weathering by trees and its impact on hillslopes - A critical literature review. *Earth-Science Review*, 159: 142-159.
- PELTIER, L. 1950.** The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology. *Annals of the Association of American Geographers*, 40(3): 214-236.

- PEPI, S., SANSONE, L., CHICCA, M., MARROCCHINO, E., VACCARO, C. 2016.** Distribution of rare earth elements in soil and grape berries of *Vitis vinifera* cv. "Glera". *Environmental Monitoring and Assessment*, 188: 477.
- PISCIOTTA, A., TUTONE, L., SAIANO, F. 2017.** Distribution of YLOID in soil-grapevine system (*Vitis vinifera* L.) as tool for geographical characterization of agro-food products. A two years case study on different grafting combinations. *Food Chemistry*, 221: 1214-1220.
- PLANTE, A. 2007.** Soil biogeochemical cycling of inorganic nutrients and metals. In: *Soil microbiology, ecology, and biochemistry* (ed. Paul, E.), Academic Press, Amsterdam. 389-432.
- POURRET, O., DAVRANCHE, M., GRUAU, G., DIA, A. 2008.** New insights into cerium anomalies in organic-rich alkaline waters. *Chemical Geology*, 251: 120-127.
- PROTANO, G., ROSSI, S. 2014.** Relationship between soil geochemistry and grape composition in Tuscany (Italy). *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 000, 1-19.
- PSZCZÓLKOWSKI, P. 1992.** Elección de sistemas de conducción destinados a la obtención de vinos finos: parronal o espalderas. Seminario Internacional: La vitivinicultura del futuro. INIA, Talca. 63-72.
- PUNTURO, R., D'ANTONE, C., PEPI, S., VACCARO, C. 2018.** Rare earth elements absorption patterns in grapevine "*Vitis vinifera* L." cultivated in carbonate terrains (south-eastern Sicily, Italy). *Environmental Earth Sciences*, 77: 801.
- REES, G. L., PETTYGROVE, G. S., SOUTHARD, R. J. 2013.** Estimating Plant-Available Potassium in Potassium-Fixing Soils. *Commun. Soil Sci. Plan.*, 44(1-4), 741-748.
- REGLAMENTO SANITARIO DE LOS ALIMENTOS. 1997.** Decreto N° 977/96. Artículo 160. De los metales pesados. Gobierno de Chile.
- RODRÍGUEZ, M.P. 2008.** Evolución de la erosión y del relieve del antearco de Chile Central (33-34°S) durante el Neógeno mediante el análisis de minerales pesados detríticos y la geomorfología. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geología. Universidad de Chile. 40 pp.
- RODRÍGUEZ, M., ARAÚJO, C.W., MIRANDA, C., AGRA, Y.J., AGRA, Y.J., DE AGUIAR, A.M., MONTERO, A., MUÑIZ, O., ESTEVEZ, J. 2018.** Rare-earth-element geochemistry in soils developed in different geological settings of Cuba. *Catena*, 162: 317-324.
- ROGIERS, S. Y., SMITH, J. A., WHITE, R., KELLER, M., HOLZAPFEL, B., P., VIRGONA, J. M. 2001.** Vascular function in berries of *Vitis vinifera* (L) cv. Shiraz. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 7:, 46-51.
- ROGIERS, S. Y., GREER, D. H., HATFIELD, J. M., ORCHARD, B. A., KELLER, M. 2006.** Mineral sinks within ripening grape berries (*Vitis vinifera* L.). *Vitis*, 45(3): 115-123.
- RUDNICK, R.L., FOUNTAIN, D.M. 1995.** Nature and composition of the continental crust -- a lower crustal perspective. *Reviews in Geophysics*, 33: 267-309.
- SADZAWKA, A.; CARRASCO, M.; GREZ, R.; MORA, M.; FLORES, H., NEAMAN, A. 2004.** Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo: 113 pp.

- SÁEZ-PLAZA, P., NAVAS, M. J., WYBRANIEC, S., MICHALOWSKI, T., GARCÍA, A. 2013.** An overview of the Kjeldahl Method of nitrogen determination. Part II. Sample preparation, working scale, instrumental finish, and quality control. *Crit. Rev. Anal. Chem.* 43(4), 224-272.
- SALGADO, P. 2019.** Herencia mineralógica del material parental en los filosilicatos secundarios presentes en suelos vitivinícolas de la Zona Central de Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. 214 pp.
- SANDOVAL, M., DÖRNER, J., SEGUEL, O., CUEVAS, J., RIVERA, D. 2011.** Métodos de análisis físico de suelos. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. 75 pp.
- SCHOENEBERGER, P. J., WYSOCKI, D. A., BENHAM, E. C., SOIL SURVEY STAFF. 2012.** Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- SERNAGEOMIN. 2004.** Mapa Geológico de Chile. Escala 1: 1.000.000. Publicación geológica digital N°7. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- SERRA, I., STREVER, A., MYBURGH, P. A., DELOIRE, A. 2014.** Review: the interaction between rootstocks and cultivars (*Vitis vinifera* L.) to enhance drought tolerance in grapevine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20: 1-14.
- STANLEY, C.R., LAWIE, D. 2007.** Average relative error in geochemical determinations: Clarification, calculation, and a plea for consistency. *Exploration and Mining Geology*, 16(3-4): 267-275.
- STANLEY, C., SMEE, B. 2007.** Strategies for reducing sampling errors in exploration and resource definition drilling programs for gold deposits. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis*, 7: 1-12.
- STEFFENS, D., HÜTSCH, B.W., ESCHHOLZ, T., LOŠÁK, T., SCHUBERT, S. 2005.** Water logging may inhibit plant growth primarily by nutrient deficiency rather than nutrient toxicity. *Plant, Soil and Environment*, 51(12): 545-552.
- STEVENSON, F. J., COLE, M. A. 1999.** Cycles of soil. Second edition. John Wiley & Sons, New York. 427 pp.
- SUN, H., HAN, J., LI, D., ZHANG, S., LU, X., 2010.** Chemical weathering Inferred from riverine water chemistry in the lower Xiajiang basin, South China. *Science of the Total Environment*, 408: 4749-4760.
- SURDYKA, N., CARYA, L., BLAGOJEVIC, S., JOVANOVIĆ, Z., STIKIĆ, R., VUCELIĆ-RADOVIĆ, B., ZARKOVIĆ, B., SANDEI, L., PETTENATI, M., KLOPPMANNA, W. 2010.** Impact of irrigation with treated low quality water on the heavy metal contents of a soil-crop system in Serbia. *Agricultural Water Management*, 98: 451-457.
- TAGLIAVINI, M., ROMBOLÀ, A. D., 2001.** Iron deficiency and chlorosis in orchard and vineyard ecosystems. *Eur. J. Agron.* 15(2), 71-92.
- TAYLOR, S.R., MCLENNAN, S.M. 1985.** The Continental Crust: Its composition and evolution. Blackwell, Oxford. 312 pp.
- TAYLOR, S.R., MCLENNAN, S.M. 1995.** The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews in Geophysics*, 33: 241-265.



- TORRENT, J. 2005.** Mediterranean soils. In: Encyclopedia of soils in the environment (ed. Hillel, D). Columbia University, New York, 2: 418-427.
- TYLER, G. 2004.** Rare earth elements in soil and plant systems: A review. *Plant and Soil*, 267: 191-206.
- TYLER, G., OLSSON, T. 2001.** Plant uptake of major and minor mineral elements as influenced by soil acidity and liming. *Plant and Soil*, 230: 307-321.
- VILLASECA, S. 1983.** Acidez de las aguas lluvias en la Región Metropolitana y V Región. III Simposio sobre contaminación ambiental, orientado al recurso agua. Tomo I: 144-150.
- VORONEY, R.P. 2007.** The soil habitat. In: *Soil microbiology, ecology, and biochemistry* (ed. Paul, E.), Academic Press, Amsterdam. 25-49.
- WALKER, J., HAYS P.B., KASTING J.F. 1981.** A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 86(C10): 9776-9782.
- WALL, R., GANA, P., GUTIERREZ, A., 1996.** Mapa Geológico del área San Antonio-Melipilla, Regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Mapas Geológicos N° 2, escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- WEIL, R., BRADY, N. 2017.** The nature and properties of soils. Fifteenth edition. Pearson Education Limited. England. 1104 pp.
- WHITE, A.F. 2003.** Natural weathering rates of silicate minerals. In: *Treatise on Geochemistry* (eds. Holland, H.D., Turekian, K.K.), Elsevier-Pergamon, Oxford. Vol. 5: 133-168.
- WHITE, W.M. 2005.** Geochemistry. Unpublished text. University of Cornell.
- WHITE, J.G., ZOSOSKI, R.J. 1999.** Mapping soil micronutrients. *Field Crops Research*, 60: 11-26.
- WILSON, J. 2004.** Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates. *Clay Minerals*, 39: 233-266.
- YAALON, D.H. 1997.** Soils in the Mediterranean region: what makes them different? *Catena*, 28(3-4): 157-169.
- YUAN, G., THENG, B. 2012.** Clay-organic interactions in Soil Environments. In *Handbook of Soil Science: Resource management and environmental impacts. Second Edition* (Eds. Huang, P.M, Li, Y., Sumner, M.) CRC Press, Taylor & Francis Group. 2: 2.1-2.20.
- ZAHARESCU, D., BURGHELEA, C., DONTSOVA, K., PRESLER, J., MAIER, R., HUXMAN, T., DOMANIK, K., HUNT, E., AMISTADI, M., GADDIS, E., PALACIOS-MENENDEZ, M., VAQUERA-IBARRA M., CHOROVER, J. 2017.** Ecosystem composition controls the fate of rare earth elements during incipient soil genesis. *Scientific Reports* 7: 43208.

## **ANEXOS DIGITALES**