



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

**ORIGEN Y COMPORTAMIENTO DEL CO₂ DIFUSO DEL SUELO EN LOS
SISTEMAS GEOTÉRMICOS DE JUNCALITO (68°55'50"-68°38'20"W y 26°25'-
26°31'30"S, REGIÓN DE ATACAMA) Y COLPITAS (69°29'30"-69°23'30"W y
17°50'30"S-18°S, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA), CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

ÁLVARO ANTONIO NAVARRETE CALVO

PROFESOR GUÍA:
MARTIN REICH MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
CATALINA MAYORGA LERTORA
DIEGO MORATA CÉSPEDES

SANTIAGO DE CHILE
MAYO, 2012

RESUMEN

Este trabajo contempla la recopilación bibliográfica, aplicación y evaluación del método de medición del CO₂ difuso desde el suelo (CO₂-DDS), como técnica de exploración geoquímica en la prospección geotérmica en Chile. Esto debido a que este gas es uno de los más abundantes en sistemas geotermales asociados a volcanismo. Este estudio fue pionero en exploración geotérmica en el país, y fue realizado en conjunto con la empresa Energía Andina (EASA) y el CEGA en los campos geotermales de Juncalito y Colpitas, dos concesiones de exploración de EASA. El sistema de la cámara de acumulación (SCA), consiste en medir la tasa de acumulación de CO₂ que emana desde el suelo dentro de una cámara dispuesta sobre éste, a través de un detector infrarrojo. Con estos datos se estiman flujos puntuales de CO₂-DDS. Las mediciones siguen una planificación espacial (perfiles o grillas), dada por información geológica, geoquímica o geofísica.

Los resultados fueron distintos para cada zona. En Colpitas se registraron altos valores de flujo de CO₂-DDS, asociados muchas veces a rasgos geológicos muy particulares, por lo que no se considera un flujo difuso en la zona, sino más bien dado por estructuras de desgasificación con orientaciones preferenciales. Por otra parte, en Juncalito, los valores de flujo medidos fueron muy bajos, difíciles de correlacionar geológicamente. Estos resultados motivaron un estudio sistemático acerca de las fuentes posibles de CO₂-DDS, y probables factores que pueden modificar las concentraciones y flujos del gas, desde su fuente hasta la superficie en campos geotermales. Dentro de las fuentes destacan la de nivel profundo, hidrotermal o magmático; y de nivel somero, biológico. Dentro de los factores, se encuentran los inherentes al sistema hidrotermal, profundos y de largo plazo, como las condiciones geológicas y estructurales de la zona (grado de permeabilidad), procesos físico-químicos de condensación del gas en agua. Así también se consideraron los llamados factores externos, parámetros atmosféricos que pueden generar variaciones en las concentraciones y flujos de CO₂-DDS.

En Colpitas, al correlacionar los resultados de CO₂-DDS con los datos de geología, no se observó una litología que favoreciera el flujo de CO₂-DDS. En cambio, sí se encontraron estructuras inferidas que lo facilitan. De este mismo modo, se reconoció una correlación con los datos de química de aguas, puesto que un aumento de HCO₃ en las aguas termales puede deberse a procesos de condensación de CO₂. Según el método estadístico del flujo de CO₂, se identifican 2 orígenes; somero y profundo, la diferencia entre estos valores es de 1 hasta 4 órdenes de magnitud. Además, se cuenta con valores de δ¹³C desde gases libres en manantiales termales que sugieren el origen profundo del CO₂. Por lo tanto, la conclusión para Colpitas es que existe una fuente en profundidad desgasificándose, con estructuras que controlan y permiten su ascenso; y aguas subterráneas someras que están condensando estos gases hidrotermales. Todo esto en conjunto sirve para establecer que la zona de Colpitas presenta un sistema hidrotermal activo con potencial geotérmico. Por otro lado, en Juncalito no se observa ninguna correlación entre los valores de CO₂-DDS y alguno de los antecedentes: geológicos, estructurales o geoquímicos. Con el método estadístico sólo se reconoce una posible fuente para el CO₂, pero no se logra establecer si es somera o profunda, debido a que la señal de CO₂ puede estar influenciada por los factores y procesos geológicos durante su ascenso, pero tampoco existen agentes biogénicos evidentes en la zona para asignarle un origen biológico. Así es que el sistema hidrotermal de Juncalito presenta aun incertidumbres respecto del origen y comportamiento del CO₂-DDS. Los valores y correlaciones de CO₂-DDS contribuyeron a la elaboración de un modelo conceptual esquemático para cada zona de estudio. La evaluación del método es positiva, ya que es capaz de mostrar desgasificación profunda, pero su interpretación requiere más investigación, ya que la complejidad geológica estratigráfica-estructural Chilena no permite ser comparada de manera directa las interpretaciones efectuadas en otros países. Se sugiere que el estudio sea acompañado con mediciones de isotopos de δ¹³C, que pueden ser capaces de develar el origen del CO₂ y que sean efectuadas en zonas con permeabilidad estructural media o alta, al menos inferida.

*Dedicado al guerrero universal
que todos llevamos dentro,
porque es capaz de entender
que la causa de la totalidad
y la evolución consciente
es mucho más importante
que su pequeño problema.*

*Al enlazador de mundos,
capaz de morir para nacer,
de llegar al final para empezar.*

*A la sincronía
por esconder
este precioso laberinto
tiempo espacio energía*

Agradecimientos

Primero que todo agradezco a EASA, a todo su cuerpo de investigadores técnicos, ayudantes y administrativos que hicieron posible este trabajo, son todos grandes personas, en especial agradecer a Catalina y Jorge quiénes me brindaron la oportunidad de trabajar en este tema y me apoyaron a lo largo del estudio. También al CEGA, en especial a Martin por contribuir con su experiencia, apoyo y ayuda brindados en los momentos importantes de duda e incertidumbre. Además, a los especialistas externos que prestaron apoyo con su experiencia, Stuart Simmons, Mateo Lelli y Giovanni Chiodini.

Con mucho cariño y completa gratitud, agradezco a mi familia completa, Clara mi madre, Juan mi padre y a mis hermanos Viviana, Juan Pablo y Catalina, por toda la fuerza, motivación, valores, amor y buenas vibras que me dan. A mis padres “postizos”, esos que la vida supo poner en mi camino para que me dieran cariño, consejos y más aprendizaje. A los tíos, primos, sobrinos y abuelos que me acompañaron también, con energía y bendiciones, en especial a mi abuelita Carmen, a Galvita, y a aquellos que ya desencarnaron, José Miguel, príncipe de los caminos; Carmen, la machi; Ofelia la maldadosa y al abuelo Osvaldo siempre presente.

Gracias a todos los amigos de la vida que me han sabido querer desde pequeño, en las buenas y en las malas, en la lejanía y en la cercanía, de extremo a extremo: Fito, Gaspar, Juan, Lucho, Eric, Pancho y Ángel. A todos los que han aparecido y han dejado huellas de afecto y amistad valiosa, en especial los compañeros de geología, Nico, Rodrigo, Nacho, Paula, Susi, Pablo, Vivi, Carter, Cami y todos aquellos con los que compartimos el patio de los Naranjos, terrenos varios y con quienes compartimos y seguiremos compartiendo la mística de amar, proteger y entender algo de la Tierra. A todos aquellos que supieron compartir la alegría y que también supieron darme un espaldarazo de ánimo cuando me vieron cabizbajo.

Gracias a los amores que he encontrado en mi recorrido de vida, porque me han permitido llegar a construir los vehículos de mi ser, porque me han ayudado a aprender, a buscar lo que he necesitado, a entender que la vida es bella y que toda circunstancia es importante para manifestar nuestra grandeza y lo que nos falta para reencontrarnos con ella. Gracias Roxana, Paulina, Dixie y Javiera. Gracias por su energía, su dedicación, su motivación y su amor.

Inolvidable es el recuerdo de María Rosa, parte fundamental en la formación de todo geólogo de la escuela, gracias por tu paciencia y tu eterna buena voluntad. Hoy agradecemos a Blanca por seguir en ese rol. También se agradece la enseñanza y motivación de los profesores, en especial a Pancho Hervé, formador de amantes de la Tierra, que me ayudó en la decisión de estudiar esta hermosa carrera.

Por último, un gran agradecimiento a todos aquellos que de alguna forma me han enseñado el camino para llegar a conocer a la conciencia pura, aquella esencia absoluta no cambiante detrás de todo, que nos ama, nos guía y nos permite ser gotas de agua en el océano, pero sin dejar de ser gotas. Gracias Marco, Patricia May, Marce, “yoguis” kundalini, swamis y devotos de Krishna, guías holísticos, hermanos hippies, chamanes y poetas danzantes por su luz amorosa y sabia.

Son muchas las personas que quisiera incluir en este momento que ayudaron a que este trabajo se llevara a cabo, pero no caben dentro de una página de manuscrito. Ellas saben su importancia para mí y para lo que fue esta investigación, gracias y no se sientan, porque sí me acordé de ustedes.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1	1
1.1 Introducción	1
1.2 Exposición del problema	1
1.3 Objetivo.....	4
1.3.1 General	4
1.3.2 Específicos	4
1.4 Hipótesis	4
1.5 Metodología.....	4
1.5.1 Referente al objetivo específico (a).....	4
1.5.2 Referente al objetivo específico (b).....	5
1.5.3 Referente al objetivo específico (c).....	5
1.6 Ubicación y accesos.....	6
1.6.1 Juncalito.....	6
1.6.2 Colpitas.....	6
Capítulo 2. Marco geológico.....	8
2.1 Geología Juncalito.....	9
2.1.1 Unidades Geológicas	9
2.1.1.1 Formación Pantanoso (PTrp, Pérmico-Triásico).....	9
2.1.1.2 Pórfidos riolíticos (PTrpr, Pérmico -Triásico)	9
2.1.1.3 Estratos del Río Juncalito (OMrj, Oligoceno Superior-Mioceno Inferior).....	10
2.1.1.4 Estratos de Sierra de Aliste (Misa, Mioceno Inferior)	10
2.1.1.5 Ignimbrita Laguna Verde (Piilv, Plioceno Inferior)	11
2.1.1.6 Complejos volcánicos y estratovolcanes (Psv, Plioceno Superior)	12
2.1.1.7 Complejos volcánicos y estratovolcanes (PIHv, Cuaternario)	12
2.1.1.8 Depósitos aluviales antiguos (Pa, Plioceno)	12
2.1.1.9 Depósitos aluviales y coluviales indiferenciados (PI)	13
2.1.1.10 Depósitos glaciares (PIHg, Pleistoceno - Holoceno)	13
2.1.1.11 Depósitos coluviales (PIHc, Pleistoceno - Holoceno).....	13
2.1.1.12 Depósitos aluviales y coluviales (PIHac, Pleistoceno - Holoceno).....	13
2.1.1.13 Depósitos aluviales (PIHa, Pleistoceno - Holoceno).....	13

2.1.2 Geología estructural	13
2.2 Geología Colpitas	14
2.2.1 Unidades Geológicas	14
2.2.1.1 Formación Lupica (OMI, Oligoceno Superior-Mioceno Inferior)	14
2.2.1.2 Lavas del Mioceno Superior (Msv, Mioceno Superior)	15
2.2.1.3 Ignimbrita Lauca (Pil, Plioceno Superior)	15
2.2.1.4 Formación Huaylas (PPIh, Plioceno-Pleistoceno)	15
2.2.1.5 Volcán Copatanca (PPIvcop, Plioceno Superior-Pleistoceno)	16
2.2.1.6 Depósitos glaciales (PIg, Pleistoceno)	16
2.2.1.7 Depósitos glaciales retrabajados (PIHgac, Pleistoceno-Holoceno).....	17
2.2.1.8 Glaciares de roca (Hgr, Holoceno).....	17
2.2.1.9 Depósitos coluviales modernos (Hc, Holoceno)	17
2.2.1.10 Depósitos aluviales modernos y fluvio-aluviales (Ha-Hfa, Holoceno)	17
2.2.2 Geología Estructural.....	18
Capítulo 3. Mediciones y metodología	19
3.1 Mediciones y muestras.....	19
3.1.1 Criterio de selección de área de interés	20
3.1.1.1 Juncalito	20
3.1.1.2 Colpitas.....	21
3.2 Metodología.....	21
3.2.1 Metodología CO ₂ -DDS	21
3.2.1.1 Metodología de cámara de acumulación	21
3.2.1.2 Protocolo de medición en terreno de CO ₂ -DDS	24
3.2.1.3 Cálculo de flujo	25
3.2.1.4 Trabajo estadístico de los datos	27
3.2.2 Metodología química de aguas	27
3.2.3 Metodología δ ¹³ C-CO ₂	27
Capítulo 4. Resultados.....	29
4.1 Resultados CO ₂ -DDS.....	29
4.1.1 Juncalito.....	29
4.1.1.1 Primera campaña:	30
4.1.1.2 Segunda campaña:	32
4.1.1.3 Tercera campaña	35
4.1.2 Colpitas.....	40
4.1.2.1 Primera campaña:	41

4.1.2.2 Segunda campaña:	47
4.1.2.2 Grilla de nivel base	58
4.2 Resultados análisis estadísticos flujo CO ₂ -DDS.....	60
4.2.1 Juncalito.....	60
4.2.2 Colpitas.....	61
4.3 Resultados Geoquímica de aguas	62
4.3.1 Juncalito.....	63
4.3.2 Colpitas.....	67
4.4 Resultados del $\delta^{13}\text{C-CO}_2$	71
4.4.1 Juncalito.....	72
4.4.2 Colpitas.....	73
Capítulo 5. Discusión	74
5.1 Aplicaciones del método de CO ₂ -DDS.....	74
5.1.1 Origen del CO ₂	74
5.1.2 Procesos físico-químicos, condiciones geológicas y factores ambientales que intervienen durante el ascenso del CO ₂	75
5.1.2.1 Procesos físico-químicos	75
5.1.2.2 Condiciones geológicas y su relación con el ascenso del CO ₂ (g)	77
5.1.2.3 Factores ambientales	78
5.2 Geoquímica de aguas	79
5.2.1 Juncalito.....	80
5.2.2 Colpitas.....	82
5.3 Interpretación de los datos de flujo de CO ₂ -DDS	83
5.3.1 Juncalito.....	83
5.3.1.1 Origen	84
5.3.1.2 Procesos, condiciones y factores que modifican concentraciones de CO ₂ durante su ascenso	85
5.3.2 Colpitas.....	86
5.3.2.1 Origen CO ₂ -DDS	87
5.3.2.1.1 Método GSA	87
5.3.2.2 Procesos, condiciones y factores que modifican concentraciones de CO ₂ durante su ascenso	87
5.4 Correlación datos de flujo de CO ₂ -DDS con geología y geoquímica de aguas termales.....	90
5.4.1 Juncalito.....	90
5.4.2 Colpitas.....	95
Capítulo 6. Conclusiones.....	99

Capítulo 7 Referencias	102
Anexos	105
Anexo A: CO ₂ -DDS.....	105
A.1. Datos de flujo de CO ₂ -DDS registrados en Juncalito	105
A.2. Datos de flujo de CO ₂ -DDS registrados en Colpitas	114
Anexo B: Geología	125
B.1. Geología Juncalito	125
B.2. Geología Colpitas.....	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación y accesos zona de estudio de Juncalito (recuadro azul). Imagen satelital ArcGlobe.....	6
Figura 1.2. Ubicación y accesos zona de estudio de Colpitas (recuadro verde). Imagen satelital ArcGlobe.	7
Figura 2.1. Distribución general de las zonas volcánicas de los Andes. El cuadro rojo muestra la disposición de los principales volcanes de la ZVC, el vector y módulo de convergencia de la subducción, y la edad y forma de la placa subductada bajo los Andes Centrales (modificado de Stern et al., 2007). En el recuadro azul se muestra ubicación de Juncalito y en el verde la de Colpitas.....	8
Figura 3.1. Ubicación muestras de aguas, de precipitados minerales y puntos de medición de CO ₂ -DDS, sobre imagen LANDSAT. En recuadro azul se señala sector de Llano Los Cuyanos. En recuadro naranja se señala sector de Pampa la Ola (correspondiente a la línea base).19	
Figura 3.2. Ubicación muestras de aguas, de precipitados minerales y puntos de medición de CO ₂ -DDS, sobre imagen SPOT. En recuadro azul se señala sector Bofedal de Colpitas. En recuadro naranja se señala sector de Bofedal de nivel base.	20
Figura 3.3 Sistema de cámara de acumulación como medidor de concentraciones y flujo de CO ₂ . Visión en planta (extraído y modificado de www.westsystems.com/portable.html). .	22
Figura 3.4. Cámara de acumulación. a) Vista de perfil b) Vista interna de la cámara	23
Figura 3.5. Gráfico que muestra la curva tipo de acumulación de CO ₂ difuso desde el suelo en el tiempo (Fridriksson et al., 2009).	23
Figura 3.6. Procedimiento de medida de CO ₂ -DDS. a) Medición de CO ₂ atmosférico. b) y c) Colocar cámara de acumulación en el suelo para medir aumento de concentración de CO ₂ -DDS. d) Nuevamente medición de CO ₂ atmosférico.	24
Figura 3.7. Gráfico de medición de CO ₂ -DDS de Colpitas. a) Primera medición de CO ₂ atmosférico b) Registro incremento de concentraciones de CO ₂ -DDS c) Medición final de CO ₂ atmosférico.	25
Figura 4.1. Distribución y magnitud de las concentraciones máximas de CO ₂ -DDS medidas en Juncalito.....	29
Figura 4.2. Distribución y magnitud de flujos de CO ₂ -DDS medidos en Juncalito.	30
Figura 4.3. Distribución y magnitud de las concentraciones máximas de CO ₂ -DDS medidas en los perfiles de la primera campaña. En elipses/círculos se muestra sectores a abarcar con mediciones tipo grilla en la segunda campaña.	31
Figura 4.4. Distribución y magnitud de los flujos de CO ₂ -DDS medidos en los perfiles de la primera campaña. En elipses/círculos se muestra sectores a abarcar con mediciones tipo grilla en la segunda campaña.	32
Figura 4.5. Distribución y magnitud de las concentraciones máximas de CO ₂ -DDS medidos en las grillas de la segunda campaña. En elipses/círculos se muestra sectores abarcados con las grillas en la segunda campaña.	33
Figura 4.6. Distribución y magnitud de los flujos de CO ₂ -DDS medidas en grillas de la segunda campaña. En elipses/círculos se muestra sectores abarcados con las grillas en la segunda campaña.	33

Figura 4.7. Distribución y magnitud de las mediciones de flujos (a) y concentraciones máximas (b) de CO ₂ -DDS efectuadas en las grillas 1 y 2 de la segunda campaña.	34
Figura 4.8. Distribución y magnitud de las mediciones de flujos (a) y concentraciones máximas (b) de CO ₂ -DDS efectuadas en la grilla 3 de la segunda campaña.....	34
Figura 4.9. Distribución y magnitud de las mediciones de flujos (a) y concentraciones máximas (b) de CO ₂ -DDS efectuadas en la grilla 4 de la segunda campaña.....	35
Figura 4.10. Puntos de medición de variación diurna. Tercera campaña.	36
Figura 4.11. Variación diurna de flujo de CO ₂ -DDS durante un día de medición en 3 puntos, representados como grilla 1, 3 y 4. Tercera campaña.....	36
Figura 4.12. Correlación entre la variación de parámetros ambientales y la variación diurna de flujo de CO ₂ -DDS durante un día de medición para los 3 puntos, representados como grilla 1, 3 y 4. Tercera campaña. a) Temperatura del aire versus Flujo CO ₂ -DDS. b) Temperatura del suelo versus Flujo CO ₂ -DDS. c) Presión versus Flujo CO ₂ -DDS. d) Velocidad del viento versus Flujo CO ₂ -DDS.	38
Figura 4.13. a) Modelo inverso de flujo de CO ₂ -DDS relacionado con parámetros ambientales, muestra flujos reales y estimados por el modelo en cada punto representado por G1, G3 y G4. b) Error porcentual entre el flujo real y el estimado en cada punto.....	39
Figura 4.14. Distribución y magnitud de las mediciones de flujos (a) y concentraciones máximas (b) de CO ₂ -DDS efectuadas en la grilla de nivel base de la tercera campaña. ...	40
Figura 4.15. Distribución y magnitud de los flujos de CO ₂ -DDS medidos en Colpitas.....	41
Figura 4.16. Muestra la distribución y la magnitud de los flujos de CO ₂ -DDS medidos en el Bofedal N.	42
Figura 4.17. Muestra la distribución y la magnitud de los flujos de CO ₂ -DDS medidos en el Bofedal S.	43
Figura 4.18. Morfología de estructuras circulares irregulares en el suelo.....	44
Figura 4.19. Estructuras circulares alineadas aproximadamente NS, destacadas con las elipses rojas.....	44
Figura 4.20. Parches de ignimbrita alterada fuertemente a arcillas muy porosas.	45
Figura 4.21. Calicata en el BS1. a) vista longitudinal. b) Detalle al interior de calicata. ..	45
Figura 4.22. Ubicación de puntos cerca de manifestaciones en BS4, ver 4.17. a) Detalle en planta b) se muestra en elipse la ubicación de valores altos en primera campaña.	46
Figura 4.23. Zona de depósitos erodados, alterados, sin vegetación. a) Detalle en planta, ver 4.16. b) se muestra en elipse la ubicación de valores altos en primera campaña.....	46
Figura 4.24. Manantial termal con burbujeo en BN. a) Detalle en planta, ver 4.16. b) expresión en terreno.....	47
Figura 4.25. Distribución y magnitud de flujos de CO ₂ -DDS medidos en la segunda campaña.	48
Figura 4.25. a) Pequeño parche de ignimbrita alterado demarcado por elipse roja, en BS1. b) Acercamiento a punto de medición.	49
Figura 4.26. Alineamiento de altos flujos de CO ₂ -DDS asociados a sectores de alteración de suelo y rocas alteradas en BS2. a) Ubicación en planta, ver fig 4.17. b) Ubicación terreno50	
Figura 4.27. Alineamiento de altos flujos de CO ₂ -DDS asociado a rasgos de alteración, en orientación ENE-WSW. El detalle de 1, 2 y 3 se muestra en las siguientes figuras.	50

Figura 4.28. Detalle de 1) de la fig. 4.27. a) extensión completa. b) lugar de medición, en este se aprecia la marca que deja la cámara al ser enterrada en el suelo.	50
Figura 4.29. Detalle de 2) de la fig. 4.27. a) Observación cercana de una barra fluvial/palustre alterada. b) y c) un acercamiento de la barra, muestra zonaciones similares a las descritas antes, óxidos, sales blancas y amarillas.....	51
Figura 4.30. Detalle de 3) de la fig. 4.27. a) Observación de un afloramiento de ignimbrita alterada. b) y c) acercamientos del afloramiento, precipitados de minerales amarillos.	51
Figura 4.31. Sector ubicado unos metros al WSW del afloramiento mostrado en 4.30. a) Medición sobre ignimbrita alterada, mostrando el lineamiento en sentido contrario, WSW-ENE, elipse roja muestra punto de medición. b) Detalle de suelo alterado con minerales pardo anaranjados o amarillentos.	52
Figura 4.32. Alineamiento de valores altos de flujos de CO ₂ -DDS asociados a estructuras circulares, resaltados con líneas punteadas en verde. Separados en 1 y 2.	53
Figura 4.33. Alineamiento 1) de fig 4.32. a) Detalle del primer alineamiento. Las estructuras se observan alargadas. En elipse roja, se denota ubicación de b). b) Detalle de más estructuras, alineadas y agrupadas. En elipse se marca ubicación de c). c) Detalle de estructura circular característica.	54
Figura 4.34. Alineamiento de figura 4.32. a) Estructuras circulares alineadas aproximadamente NS, destacadas con las elipses rojas, las azules muestran puntos de medición de flujos. (b) Ubicación de estos puntos en planta, ver fig. 4.32.....	54
Figura 4.35. a) Ubicación en planta uno de los puntos de máximo flujo de CO ₂ -DDS, ver fig. 4.32. b) Ubicación y apariencia en terreno, en elipse azul se muestra punto exacto de medición y colección de muestra de precipitados para DRX. c) Detalle del punto.	55
Figura 4.36. a) Ubicación en planta uno de los puntos de máximo flujo de CO ₂ -DDS en sector occidental de BS3, ver fig. 4.32. b) Ubicación y apariencia en terreno, en elipse azul se muestra punto exacto de medición. c) Vista en detalle del punto.	55
Figura 4.37. Alineamiento de altos valores de flujo de CO ₂ -DDS en sector de manantiales termales en BS4, ver fig. 4.17.	56
Figura 4.38. a) Ubicación de uno de los sectores extremos del lineamiento en BS4, ver fig. 4.17. b) Ubicación en terreno del punto de mayor flujo de CO ₂ -DDS en planta. c) muestra en detalle.	56
Figura 4.39. a) Ubicación del otro sector extremo del lineamiento en BS4, ver fig. 4.17. b) Ubicación en terreno del punto de mayor flujo de CO ₂ -DDS en planta. c) Vista en detalle.	57
Figura 4.40. a) Ubicación del sector medio del lineamiento en BS4 en planta, ver fig. 4.17. b) Ubicación en terreno. c) Precipitados de minerales amarillos muy cercano a pequeñas surgencias de manantiales termales. d) Estructura similar a las circulares con zonación de sales.....	57
Figura 4.41. Distribución y magnitud de flujos de CO ₂ -DDS medidos en la grilla de nivel base.	59
Figura 4.42. Histograma de flujos de CO ₂ -DDS en escala logarítmica para el sistema geotermal de Juncalito.	60
Figura 4.43. Gráfico de probabilidades acumuladas de flujos de CO ₂ -DDS en escala logarítmica para el sistema geotermal de Juncalito.	61
Figura 4.44. Histograma de flujos de CO ₂ -DDS en escala logarítmica para el sistema geotermal de Colpitas.....	61

Figura 4.45. Gráfico de probabilidades acumuladas de flujos de CO ₂ -DDS en escala logarítmica para el sistema geotermal de Colpitas.	62
Figura 4.46. Ubicación de puntos de colección de muestras y sectores de RN y RJ, dentro de la zona de Juncalito. También se destaca la zona de medición de CO ₂ -DDS con un recuadro azul.	63
Figura 4.47. a) Diagrama Piper. b) Diagrama ternario de aniones de Giggenbach.	64
Figura 4.48. Diagramas de elementos conservativos, rectas en azul muestran correlación lineal. a) Diagrama Cl/B. b) Diagrama Cl/Li. c) Diagrama Cl-B-Li, modificado Giggenbach 1991.	65
Figura 4.49. Diagramas de dispersión de elementos. a) Cl/Na. b) Ca/SO ₄ . c) HCO ₃ /Ca. d) HCO ₃ /Cl. e) SO ₄ /Cl.	66
Figura 4.50. Gráfico de isotopos estable del agua.	67
Figura 4.51. Ubicación de puntos de colección de muestras y sectores de BN, BS1, BS2, BS3 y BS4 dentro del Bofedal de Colpitas.	68
Figura 4.52. a) Diagrama Piper. b) Diagrama ternario de aniones de Giggenbach.	68
Figura 4.53. Diagramas de elementos conservativos, rectas en azul muestran correlación lineal. a) Diagrama Cl/B. b) Diagrama Cl/Li. c) Diagrama Cl-B-Li.	69
Figura 4.54. Diagramas de dispersión de elementos. a) Cl/Na b) Ca/SO ₄ c) HCO ₃ Ca d) HCO ₃ /Cl e) SO ₄ /Cl.	70
Figura 4.55. Gráfico de isotopos estables del agua.	71
Figura 4.56. Signatura isotópica del δ ¹³ C relacionada al CO ₂ derivado desde distintas fuentes (Modificado de Lewicki et al., 2004)	72
Figura 5.1. Diagrama de Sillen para el sistema carbonatado considerando una actividad de 10 ⁻² moles/l de Carbono total. Ilustra las especies predominantes según el pH.	76
Figura 5.2. a) Gráfico de concentraciones positivas de CO ₂ -DDS versus flujo positivo y no calculable o menor o igual a 0. b) Histograma de cantidad de datos que tienen flujo positivo y negativo, con concentraciones máximas de CO ₂ bajo los 406 ppm.	84
Figura 5.3. Relación entre los mayores valores de flujos de CO ₂ -DDS medidos en las grillas y su hora de medida. Datos de la 1 ^o y 2 ^o campaña.	86
Figura 5.3. Mapa de flujos anómalos de CO ₂ -DDS en Bofedal de Colpitas. En polígono rojo se destaca toda el área de mediciones de CO ₂ -DDS y con líneas se destaca orientación de estructuras inferidas a través de flujos anómalos.	89
Figura 5.4. Flujos de CO ₂ -DDS sobrepuesto a la geología de Llano Los Cuyanos. En línea roja se ilustra perfil en donde se construye modelo conceptual esquemático.	91
Figura 5.5. Modelo conceptual esquemático del sistema geotermal de Juncalito:escenario de sistema “ciego”. Basado sobre los datos de mediciones de CO ₂ , geología y geoquímica de aguas. Dinámica de fluidos extraída de Henley, 1983 y Giggenbach, 1997.	93
Figura 5.6. Modelo conceptual esquemático del sistema geotermal de Juncalito: escenario de sistema de infiltración profunda. Basado sobre los datos de mediciones de CO ₂ , geología y geoquímica de aguas. Dinámica de fluidos extraída de Henley, 1983 y Giggenbach, 1997.	94
Figura 5.7. Flujos de CO ₂ -DDS sobre la geología local del Bofedal de Colpitas. En línea roja se ilustra perfil en donde se construye sección de modelo conceptual de Colpitas (fig 5.8).	96

Figura 5.8. Modelo conceptual esquemático del sistema geotermal del Colpitas. Modificado desde AURUM-EASA, 2011. Basado sobre los datos de mediciones de CO₂, geología y geoquímica de aguas. 98

Figura 6.1. Emisiones de CO₂ a la atmósfera de distintos sistemas hidrotermales y volcánicos. Colpitas está demarcado por la línea punteada roja. Diagrama extraído de Werner et al., 2006. 100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Estadística de las mediciones de CO ₂ -DDS Juncalito.....	30
Tabla 4.2. Estadística simple de las mediciones de CO ₂ -DDS primera campaña Juncalito.	32
Tabla 4.3. Estadística simple de las mediciones de CO ₂ -DDS segunda campaña Juncalito.	33
Tabla 4.4. Estadística de las mediciones de variación diurna de CO ₂ -DDS tercera campaña Juncalito.....	37
Tabla 4.5. Estadística de las mediciones de CO ₂ -DDS grilla Pampa La Ola, tercera campaña Juncalito.....	40
Tabla 4.6. Estadística de las mediciones de CO ₂ -DDS en Bofedal Colpitas.	41
Tabla 4.7. Estadística simple de las mediciones de CO ₂ -DDS primera campaña Colpitas.	43
Tabla 4.8. Estadística simple de las mediciones de CO ₂ -DDS segunda campaña Colpitas.	48
Tabla 4.9. Resultados DRX en muestras de estructuras circulares en BS3 y BS4.	57
Tabla 4.10. Resultados DRX en muestras del Bofedal de Colpitas (EASA, 2011).	58
Tabla 4.11. Estadística simple de las mediciones de CO ₂ -DDS segunda campaña Colpitas.	59
Tabla 4.12. Signatura isotópica del δ ¹³ C relacionada al CO ₂ derivado desde distintas fuentes (Modificado de Lewicki et al., 2004).	72
Tabla 4.13. Isotopía de δ ¹³ C-CO ₂ de las muestras de gases de Juncalito.	72
Tabla 4.14. Isotopía de δ ¹³ C-CO ₂ de las muestras de gases de Colpitas.	73
Tabla 5.1. Resumen de análisis DRX sobre precipitados en el sector de RN.	81

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula cálculo de flujo	25
Ecuación 2. Reacciones de especiación de carbonatos.....	25
Ecuación 1. Disolución de calcita en agua en presencia de CO ₂ (g)	25

Capítulo 1

1.1 Introducción

El presente estudio pretende ser un aporte para la construcción de un modelo conceptual de los sistemas geotermales de Juncalito (26°20'-26°33'S y 68°55'-68°42'W) y Colpitas (17°50'-18°S y 69°30'-69°20'). Así como también pretende evaluar la aplicación del método de medición de CO₂ difuso como herramienta de exploración geotérmica. Para esto se realizaron perfiles y grillas de medidas de CO₂ difuso en el área de interés. Los análisis fueron posibles gracias a la empresa Energía Andina (EASA).

1.2 Exposición del problema

Actualmente, el escenario económico y energético del mundo requiere la entrada al sistema de las llamadas energías renovables no convencionales (ERNC). Entre estas se encuentra la energía geotérmica. Lo primero para el desarrollo y explotación del recurso geotérmico es la exploración. Hoy en día, cuando un campo geotermal es identificado, existe un amplio espectro de técnicas de exploración para estudiarlo. La mayoría de ellas provienen de las distintas disciplinas de las geociencias. El objetivo es integrar información, para así caracterizar o estimar recursos geotermales, en cuanto a sus condiciones físico-químicas (ej. temperatura, presión, composición química); su ubicación, geometría y condiciones mecánicas (ej. profundidad, volumen y permeabilidad). De acuerdo a esta información se puede estimar un potencial geotermal y su posible aplicación. A modo de resumen, en el campo de la exploración geotérmica, se utilizan las siguientes técnicas (en fase inicial): utilización de sensores remotos, para un reconocimiento previo de la geografía, geología y alteración hidrotermal de la zona; la caracterización geológica regional o local, que abarca la estratigrafía y la geología estructural; la caracterización de la alteración hidrotermal generada por los fluidos; la caracterización geoquímica, de la roca caja, de los minerales de alteración y de los fluidos hidrotermales; la caracterización hidrogeológica, que cubre el ciclo hidrológico, aguas subterráneas y balances hídricos en la zona; la caracterización volcanológica, cuando el sistema hidrotermal puede ser asociado al volcanismo; la caracterización geofísica, que permite interpretar la naturaleza de ciertos niveles en subsuperficie, respetando los datos geológicos. Posterior a estas etapas, cuando ya se identifican puntos de interés, el estudio se puede centrar en la perforación de pozos de exploración, los cuales entregan información más certera de la estratigrafía, estructuras y condiciones fisicoquímicas en profundidad. El orden y la cantidad de técnicas a utilizar, siempre dependerá de la configuración geológica de la zona (Gupta et al., 2007).

Dentro del campo de la exploración geoquímica, el estudio en general se centra en el análisis de los fluidos, tanto la fase líquida como gaseosa. Estos estudios proveen información acerca de las condiciones y procesos en profundidad. Esto debido a que los fluidos pueden experimentar múltiples procesos durante hasta su ascenso a superficie. Una de las ventajas importantes del estudio de la fase gaseosa es que en general tiene un ascenso vertical, aunque en algunas ocasiones puede circular disuelto en la fase líquida viajando lateralmente desde una fuente. De esta forma, los gases pueden entregar información parcial acerca de la ubicación de la fuente de desgasificación. Entre los gases más comunes encontrados en sistemas geotermales, se reconocen CO₂, H₂S y CH₄ siendo el CO₂ el más abundante (Aguilera, 2008; Fridriksson, 2009). En particular, Lewicki et al. (2005), señala que el estudio del CO₂ es importante porque es el gas no-condensable con mayores concentraciones en sistemas geotermales y tiene solubilidad

moderada en el agua, lo que implica que el CO₂ de fuente volcánica-hidrotermal tiende a migrar hacia la superficie con fase gaseosa en proporción igual o mayor a la fase disuelta en el agua.

El CO₂ encontrado en sistemas geológicos puede ser generado de diferentes formas. Para explicarlo, diferenciaremos fuente profunda y somera, donde la primera es considerada como hidrotermal y la segunda, como de línea base, sin efecto hidrotermal. Dentro de la fuente profunda encontramos exsolución de CO₂ desde cuerpos ígneos (Aguilera, 2008; Ray et al. 2005), o bien exsolución de CO₂ desde un reservorio bullente (Fridriksson, 2009). Por otro lado, la fuente somera tiene a su vez 3 distintos orígenes para el CO₂: biogénica, hidrológica y atmosférica (Lewicki, 2004). Para efectos de este estudio, se considera que el CO₂ en la atmósfera tiene una concentración de aproximadamente 0.035% en volumen de aire seco (Aguilera, 2008). Cabe destacar que cuando una fuente profunda está ubicada bajo un sistema de aguas subterráneas con una alta tasa de flujo, es probable que el CO₂ pueda ser incorporado por disolución en el agua y sea transportado lateralmente lejos del reservorio, generando aguas carbonatadas (Fridriksson, 2009).

Los gases como el CO₂, pueden manifestarse en superficie de distintas formas, dependiendo si se trata de sistemas volcánicos, geotermales o termales (Aguilera, 2008). En el caso volcánico se pueden expresar en forma de fumarolas, columnas generadas en erupciones, flujos de lavas emplazadas recientemente y emisiones difusas. En el caso geotermal, en forma de fumarolas, géisers, piscinas, volcanes de barro y a veces en vertientes de agua (burbujas). En sistemas termales, sólo se presenta acompañando a la fase líquida en vertientes y a veces en piscinas (Aguilera, 2008). Este estudio se concentra en la medición del CO₂ liberado en forma de emisiones difusas desde el suelo (CO₂-DDS). La metodología para realizar las mediciones, es relativamente reciente e innovadora, implementada en volcanología y geotermia por Chiodini et al. (1998). Esta técnica permite medir la concentración de CO₂ emitido desde el suelo, así como calcular el flujo de éste. Para ello, utiliza el llamado sistema de cámara de acumulación. Los detalles de funcionamiento serán explicados en detalle en el capítulo 3 de Metodología.

El flujo de CO₂ es dinámico y se ve afectado por al menos 2 factores, uno interno, inherente al sistema hidrotermal y otro externo, como lo son los parámetros ambientales. Dentro de estos últimos se consideran: parámetros meteorológicos (presión barométrica, temperatura del aire, humedad del aire, velocidad del viento y lluvia); propiedades del suelo (porosidad, conductividad hidráulica, humedad del suelo y temperatura del suelo) y los efectos topográficos (Granieri et al., 2003, Hinkle et al., 1994). Esto ha sido mostrado en estudios de Granieri (2003) y Hinkle (1994), donde se han registrado variaciones diurnas y estacionales de las concentraciones de CO₂-DDS, vinculadas en cierto grado a variaciones de los parámetros ambientales.

Las aplicaciones del método se centran principalmente en el campo de la volcanología, específicamente como método de vigilancia, y en el campo de la geotermia. En este estudio, sólo se hará referencia a las aplicaciones en el campo de la geotermia, aunque en estricto rigor la metodología inicial de toma de muestras y procesamiento de datos es el mismo. En los estudios geotérmicos, en general, se realizan correlaciones entre altos valores de flujo de CO₂ y algún rasgo importante de un sistema geotermal. Por ejemplo, se lo relaciona con la existencia de estructuras de desgasificación (EDD-Lewicki y Brantley, 2000), ya que éstas son capaces de funcionar como canales de ascenso para el gas desde el subsuelo, y también puede ser asociado con una fuente de aporte profunda de CO₂ (Granieri et al., 2003, Chiodini et al., 2008). Otras aplicaciones encontradas en la bibliografía son: correlacionar áreas de alto flujo de CO₂ con extensión areal de reservorios geotermales en el subsuelo (Chiodini et al, 1995, extraído de Chiodini et al., 1998); utilizado como indicador de permeabilidad y como herramienta de prospección de reservorios de diferente temperatura (Chiodini et al., 1995, extraído de

Chiodini et al., 1998); método de detección de sistemas geotermales “ciegos” o “escondidos”, (Lewicki, 2005); estimar mínimo de calor total emitido desde reservorios geotermales (Chiodini et al., 2001, Fridriksson et al., 2006; extraído de Fridriksson et al., 2009). La metodología base para lograr estas aplicaciones es realizar grillas de medición de CO₂, trabajo estadístico de estos datos y así generar mapas de flujos de CO₂.

Uno de los aportes de esta técnica para la exploración es sugerir el origen del CO₂, y, de esta forma, contribuir a la construcción del modelo conceptual de un sistema geotermal. Para esta difícil tarea, existen distintos criterios o métodos, entre ellos se encuentran análisis de valores del $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{14}\text{C}$ en CO₂ y mediciones de O₂ en conjunto con el CO₂. También hay métodos estadísticos y geoestadísticos, a partir de las medidas de flujo de CO₂, que permiten detectar cuando una concentración es anómala: el análisis Bayesiano (Lewicki,2004), el GSA (Graphical Statistical Approach - Chiodini et al.,1998) y sGs (Statistical Gaussian Simulation - Cardellini,2003). En este estudio se realizó el análisis estadístico GSA y se interpretó junto a unos datos de $\delta^{13}\text{C}$.

En este trabajo, se intentará abordar el tema de la fuente de origen del CO₂ en las zonas de estudio; cual es su comportamiento, en cuanto a procesos y factores geológicos y ambientales que modifican sus concentraciones durante su ascenso a superficie. Así como también se intentará determinar si existen EDD. Esto permitirá aportar información a los modelos conceptuales de los sistemas geotermales de Juncalito y Colpitas, y a la vez se evaluará la aplicación de este método en el campo de la exploración para la geotermia, en cuanto a sus alcances y limitaciones en el contexto del Norte de Chile.

Por último, las zonas de estudio fueron elegidas bajo los siguientes criterios:

Juncalito se eligió porque de acuerdo a los antecedentes geológicos, geoquímicos y geofísicos era posible encontrar altas concentraciones de CO₂-DDS en algunos sectores. Los antecedentes geológicos regionales muestran un patrón estructural lineal de primer orden, con posibles ramificaciones, las cuales en su totalidad pueden funcionar como canales para el ascenso de gases. Además, en superficie se reconocen una serie de manifestaciones termales tipo manantiales a lo largo de un río, desde las cuales se podía esperar ascenso de CO₂, tanto en las aguas, como en las cercanías de los manantiales. También los datos de geofísica muestran que existe una zona en donde se puede esperar ascenso de fluidos. Fue precisamente en la cercanía de esos lugares en donde se realizaron las mediciones.

Colpitas se eligió principalmente porque las observaciones de terreno y la química de aguas señalaban que existía encontrar grandes concentraciones de CO₂-DDS en algunos sectores, como se detalla a continuación. En superficie se reconocen manantiales termales con presencia de burbujeo y es sabido que el gas más abundante en los campos geotermales es el CO₂ (Aguilera, 2008; Fridriksson et al., 2009); también zonas alteradas hidrotermalmente o sin vegetación, rodeadas de vegetación, lo que puede indicar altas concentraciones de CO₂-DDS, debido a que este gas en esas condiciones es capaz de eliminar la vegetación; por último, algunas calicatas con profundidad de entre 0,5m y 2m de profundidad, en donde también se encuentra roca altamente alterada a arcillas, en donde la mayor porosidad de la roca, podía aumentar la permeabilidad y con ello las concentraciones de CO₂-DDS. Además, la química de las aguas en esa zona, muestra altas concentraciones de bicarbonato, lo cual puede indicar flujo de CO₂(g) profundo y condensación de éste en acuíferos someros. Fue precisamente en la cercanía de estos lugares en donde se realizaron las mediciones, en forma de perfiles y grillas.

Este Proyecto de Memoria de Título forma parte de los Proyectos de Juncalito y Colpitas de EASA, cuyo investigador responsable es Jorge Clavero Ribes.

1.3 Objetivo

1.3.1 General

Determinar el origen y procesos que controlan las concentraciones y flujos de CO₂-DDS en las zonas de Juncalito y Colpitas.

1.3.2 Específicos

- a) Caracterizar y analizar distribución espacial de concentraciones y flujos de CO₂-DDS en las zonas de estudio.
- b) Reconocer si existen factores ambientales o geológicos que afecten las concentraciones de CO₂ -DDS.
- c) Generar modelo conceptual de los sistemas geotermales estudiados, que relacione la geología, la geoquímica de las aguas y la hidrogeología con las concentraciones de CO₂ difuso del suelo.

1.4 Hipótesis

En las zonas de Juncalito y Colpitas se reconocen concentraciones de CO₂-DDS que superan los valores normales atmosféricos. En este estudio se pretende determinar el origen predominante del CO₂-DDS y los procesos que sufre en su ascenso, relacionándolo con la información geológica, geoquímica e hidrológica disponible.

1.5 Metodología

1.5.1 Referente al objetivo específico (a).

Para caracterizar el CO₂-DDS, se utilizó el sistema de cámara de acumulación capaz de medir concentración acumulada de CO₂ en el tiempo desde el suelo. El detalle del funcionamiento del sistema será explicado en profundidad en capítulo 3.

Para caracterizar concentraciones y distribuciones de CO₂-DDS en las zonas se trazaron perfiles y luego grillas de medición. De esta forma se intentó identificar geometrías de desgasificación marcada en las zonas. Para esto se efectuaron 3 campañas de terreno en Juncalito y 2 en Colpitas.

Los perfiles y grillas de medición fueron planteados con puntos de medición cada 30 metros, espaciamiento muy similar al ocupado en trabajos similares de exploración, donde realizan mediciones en grillas de 20x20-25x25 m² (Fridriksson et al, 2006; Granieri et al, 2003). Aunque en la práctica, cuando las concentraciones de CO₂-DDS medidas eran muy bajas en un sector, se ocupó un espaciamiento alternativo de 60 m en los perfiles y 42x42 m² en las grillas, para así abarcar mayor superficie. Teniendo el criterio de que una vez encontrada una anomalía se volvería a medir cada 30 m. Cabe señalar que Fridriksson (2009), propone que esta distancia varía de acuerdo al ancho de la anomalía de desgasificación del suelo, de tal forma que con 3 o 4 mediciones este ancho quede cubierto.

La mejor forma de mostrar la distribución espacial de los datos es a través de mapas de flujo de CO₂. Para ello es necesario calcular flujos de CO₂-DDS a partir de los gradientes de concentración de CO₂ y efectuar un análisis geoestadístico de estos. En este sentido, destacan los tratamientos realizados por Chiodini (GSA) y por Cardellini(sGs).

1.5.2 Referente al objetivo específico (b).

Para reconocer si los factores ambientales tenían alguna influencia sobre las concentraciones de CO₂, se procedió a medir parámetros ambientales como: temperatura del aire y del suelo; humedad absoluta del suelo; velocidad del viento y presión barométrica. Estos fueron registrados simultáneamente con los valores del CO₂-DDS. Este procedimiento es similar al encontrado en estudios anteriores (Hinkle et al., 1994, Granieri et al., 2003), la diferencia es que ellos establecen series de tiempo con los datos.

Este procedimiento se llevó a cabo desde la segunda campaña de Juncalito. Durante la primera, solo se midió temperatura del aire y del suelo. A través de este procedimiento se espera encontrar relación entre las variaciones de las concentraciones de CO₂-DDS y los factores ambientales.

1.5.3 Referente al objetivo específico (c).

Para construir un modelo conceptual del sistema geotermal es necesario incorporar los resultados y análisis del CO₂ difuso con toda la información geológica disponible: estratigrafía, geología estructural y geoquímica de las aguas.

Para esta tarea, se desarrollará el marco geológico de las zonas. En el caso de Juncalito se utilizarán mapas geológicos preliminares efectuados por el Sernageomin (Clavero et al., 1998), de escala 1:100.000, donde se pondrá especial atención a las unidades, en cuanto a su grado de impermeabilidad, para identificar capas que puedan funcionar como sello de un sistema geotermal; así como también en el grado de permeabilidad para identificar capas que puedan funcionar como reservorio del sistema. También es muy importante identificar todas las estructuras y lineamientos presentes, incluso los inferidos, ya que pueden funcionar como canales de ascenso. Con esta información se desarrollarán uno o varios perfiles esquemáticos del subsuelo que incluyan la estratigrafía y las estructuras. En el caso de Colpitas se realizará un trabajo similar. Además de la geología local, se cuenta con datos de difracción de rayos X en algunas zonas de alteración hidrotermal. Por otra parte, la información geoquímica disponible de las aguas termales se analizará e interpretará mediante la utilización de diagramas.

Por último, se integrará toda la información obtenida con los datos de flujos de CO₂-DDS medidos para elaborar un modelo conceptual de los sistemas geotermales. De modo tal que la información en su conjunto sea coherente y en lo posible permita explicar las concentraciones de CO₂-DDS en la zona, y su implicancia en la exploración geotérmica. A través de este modelo conceptual, se evaluará la utilidad del método y sus alcances.

1.6 Ubicación y accesos

1.6.1 Juncalito

La zona de estudio se ubica por sobre los 4.000 m.s.n.m. entre las coordenadas $68^{\circ}55'50''-68^{\circ}38'20''\text{W}$ y $26^{\circ}25'-26^{\circ}31'30''\text{S}$, comuna de Diego de Almagro, provincia de Chañaral, región de Atacama. Se encuentra a 178 km de distancia aproximada en línea recta al NE de Copiapó y a 220 km por el camino que se explicará a continuación: desde Copiapó al Sur-Este, se debe seguir la ruta que va hacia Tierra Amarilla y tomar el desvío hacia el Nor-Este en la ruta 31, hacia el Salar de Maricunga o Paso internacional San Francisco. Al llegar al Salar de Maricunga, tomar el desvío hacia el Salar de Pedernales y antes de llegar al campamento La Ola virar hacia el Este por camino de tierra en dirección al embalse Juncal. Luego se debe la ruta que bordea el río Negro hasta llegar aproximadamente a la confluencia de éste con el río Juncalito.

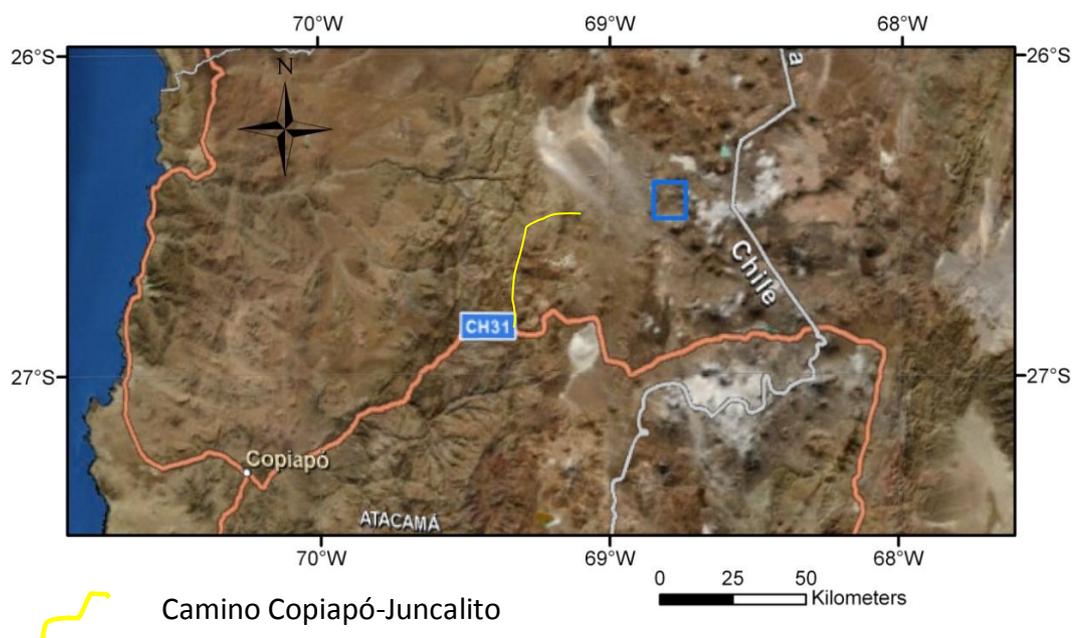
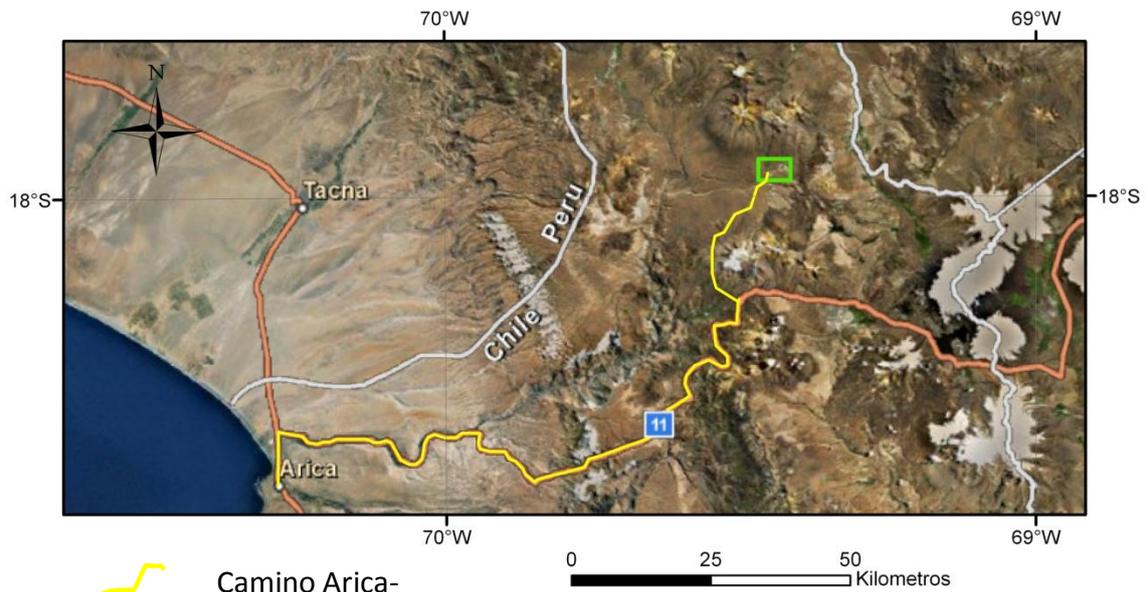


Figura 1.1. Ubicación y accesos zona de estudio de Juncalito (recuadro azul). Imagen satelital ArcGlobe.

1.6.2 Colpitas

El área de estudio se encuentra ubicada en el altiplano, a 4.200 m.s.n.m., en la décimo quinta Región de Arica y Parinacota. Está muy cerca de la frontera con Bolivia (12 km al oriente, fig 1.2) y del hito tripartito Visviri (30 km al norte). Esta se ubica específicamente entre las coordenadas $69^{\circ}29'30''\text{W}-69^{\circ}23'30''\text{W}$ y $17^{\circ}50'30''\text{S}-18^{\circ}\text{S}$ (figura 1.2) correspondiente al DATUM PSAD 56. El poblado más cercano en esta zona es Colpitas, localizado a unos 4 Km del Bofedal de Colpitas (centro de zona de estudio). Arica es la ciudad donde comienza el viaje a Colpitas por tener una distancia de desplazamiento relativamente corta, de alrededor de 112 km (fig. 1.2). Desde esta ciudad, en dirección al norte, a través de la ruta 5 se avanza hasta la intersección con la ruta R-11 (camino

internacional Chile – Bolivia), de ahí hacia el este, se cruza el valle de Lluta, pasando por los poblados de Zapahuira, Socoroma y Putre. Desde este último poblado, son alrededor de 5 km de viaje en carretera hasta el desvío que lleva hacia el NE por la ruta A-23, éste se encuentra inmediatamente después del Regimiento Reforzado n° 24 "Huamachuco". Mediante este desvío se llega al poblado de Colpitas, con una distancia aproximada de 25 km.



Camino Arica-
Figura 1.2. Ubicación y accesos zona de estudio de Colpitas (recuadro verde). Imagen satelital ArcGlobe.

Capítulo 2. Marco geológico

En este capítulo se describen los principales antecedentes geológicos, litológicos y estructurales de la zona de estudio. En primer lugar Juncalito y luego Colpitas. La caracterización de las unidades geológicas tiene como finalidad distinguir qué rol pueden jugar éstas dentro de un posible sistema geotermal. Como referencia geocronológica y estratigráfica, se ha utilizado la Tabla Estratigráfica Internacional 2009, de la International Commission on Stratigraphy (Ogg, 2009).

Las zonas de estudio se encuentran en la Cordillera de Los Andes, en el dominio de los Andes Centrales (fig 2.1), en la zona volcánica central (Stern et al., 2004; Stern et al., 2007). En este lugar, el magmatismo es producto de la subducción de la placa oceánica bajo la placa continental, en particular, porque el ángulo con el cual subducta es relativamente alto (25° - 30°), conocido como steep slab (Gutscher, 2002). Bajo la corteza superior del ZVC, en general se encuentran rocas ígneas y sedimentarias triásico-jurásicas, rocas volcanoclásticas continentales cretácicas y rocas volcánicas miocenas a recientes (Lucassen et al., 2001).

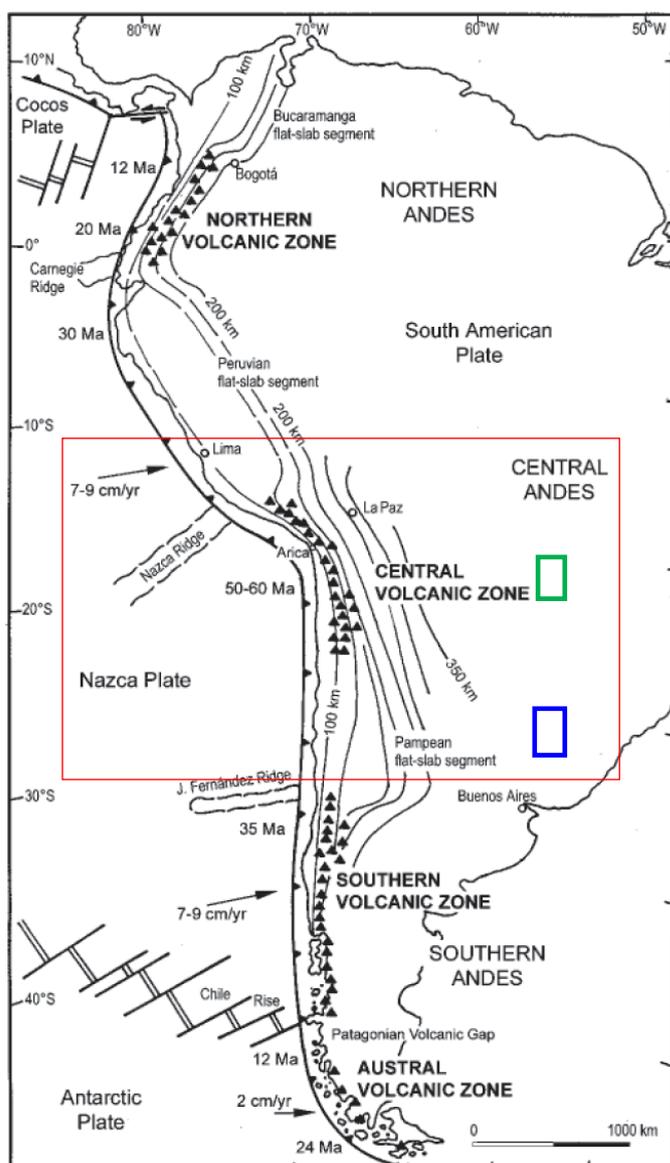


Figura 2.1. Distribución general de las zonas volcánicas de los Andes. El cuadro rojo muestra la disposición de los principales volcanes de la ZVC, el vector y módulo de convergencia de la subducción, y la edad y forma de la placa subductada bajo los Andes Centrales (modificado de Stern et al., 2007). En el recuadro azul se muestra ubicación de Juncalito y en el verde la de Colpitas.

2.1 Geología Juncalito

En esta zona, se realizaron trabajos de levantamiento geológico por parte del Sernageomin (1997 y 1998), teniendo como resultado mapas preliminares del Salar de Piedra Parada y Salar de Wheelright. Esta información se sintetiza en la siguiente descripción de las unidades geológicas y de las estructuras de la zona.

2.1.1 Unidades Geológicas

La geología de Juncalito está compuesta principalmente por rocas volcánicas, menor cantidad de rocas sedimentarias continentales, terrígenas o lacustres/evaporíticas y unidades sedimentarias no consolidadas (Mapa geológico local, Anexo B.1). Las edades de las unidades se concentran en torno al Neógeno, aunque existen algunas que pertenecen al Paleozoico (Pérmico-Triásico) y otras al Cuaternario más reciente (Plioceno hasta Holoceno).

Las unidades, ordenadas de más antigua a más joven, se detallan a continuación:

2.1.1.1 Formación Pantanoso (PTrp, Pérmico-Triásico)

Definición y relaciones estratigráficas. Secuencia volcanoclástica y subvolcánica, aflora en el área de estudio como una franja aproximadamente NS, al poniente de Llano Los Cuyanos, formando el basamento de la Cordillera de Claudio Gay. Subyace en discordancia angular a las unidades volcánicas y sedimentarias de Secuencia Sierra de Aliste (Neógeno Superior), y se encuentra en contacto tectónico con rocas de la Secuencia Río Juncalito (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior).

Litología. Secuencia volcanoclástica constituida principalmente por riolitas y riodacitas, a veces fluidales, tobas y brechas piroclásticas rojas riolíticas de grano grueso, ricas en ojos de cuarzo, de estratificación gruesa, con escasas intercalaciones de lavas y cuerpos subvolcánicos basálticos y de areniscas, conglomerados y brechas epiclásticas.

Edad. En la zona no hay datos de geocronología, aunque se tiene una edad K/Ar en biotita de una toba de esta unidad en el sector de Nevado Ojos del Salado, que arrojó 228 ± 5 Ma (Gardeweg et al., 1997), lo que indicaría una edad mínima triásica. Por otra parte, los pórfidos y granitos que la intruyen tienen edad pérmica, lo que permite inferir que la secuencia sería más bien de edad paleozoica superior, pudiendo alcanzar el Triásico.

2.1.1.2 Pórfidos riolíticos (PTrpr, Pérmico -Triásico)

Definición y relaciones de contacto. Cuerpos intrusivos porfídicos pequeños que intruyen a la Formación Pantanoso. Afloran como un cuerpo elongado en dirección NS en el flanco SE de la Sierra de Aliste. Subyace a las secuencias de Río Juncalito y Sierra de Aliste.

Litología. Corresponden a rocas ígneas holocristalinas, porfídicas, de grano medio, color rojo a violáceo, con diversos grados de alteración propilítica. Petrográficamente varían desde un pórfido granodiorítico de biotita, a un pórfido monzodiorítico cuarcífero de piroxeno y hornblenda, en la Qda. Los Cuyanos.

Edad. Se le asigna al Paleozoico Superior por correlación con intrusivos ubicados más al sur, debido a su similitud litológica y su relación espacial con la Fm. Pantanoso, donde se ha obtenido edades K-Ar de $266,5 \pm 7,8$ Ma (recalculada de Quirt, 1962) y Ar-Ar de 259 ± 3 (Clavero et al., 1997) y 267 ± 5 Ma (Gardeweg et al., 1997), todas del Pérmico.

2.1.1.3 Estratos del Río Juncalito (OMrj, Oligoceno Superior-Mioceno Inferior)

Definición y relaciones estratigráficas. Secuencia volcanoclástica que aflora en el sector occidental del área (parte baja de la cuenca del Río Juncalito), con un espesor variable entre 2 y 300m. Sobreyace en discordancia de erosión a la secuencia volcanoclástica de la Formación Pantanoso y granitoides del Pérmico-Triásico. Subyace, en aparente discordancia angular, a depósitos volcánicos de los Estratos de Sierra de Aliste (Mioceno Inferior).

Litología. Está conformada por calizas, calcarenitas, ignimbritas riolíticas a dacíticas, depósitos de bloques y ceniza dacíticos y depósitos de gravas aluviales. Se reconocen dos facies principales: una sedimentaria y otra volcanoclástica, las cuales engranan parcialmente.

a) Facies sedimentaria. Secuencia que alcanza hasta 20 m de espesor, dispuesta subhorizontalmente y, en sectores, fuertemente plegada. Está compuesta principalmente por calizas blancas y amarillas, muy compactas (30-40cm de espesor), de grano fino. También presenta intercalaciones de niveles más ricos en material terrígeno, de menor grado de compactación, en capas de similar espesor. En el Río Juncalito presenta una intercalación de una ignimbrita dacítica rosada (5m de espesor), rica en pómez blancas y pequeños líticos volcánicos, que arrojaron una edad en biotita de $25,7 \pm 1,7$ Ma. Esta facies clástico-calcárea engrana lateralmente con la facies volcanoclástica.

b) Facies volcanoclástica. Secuencia conformada principalmente por tobas dacíticas con algunas intercalaciones de depósitos de bloques y ceniza dacíticos, riolitas fluidales y dacitas subordinadas en el borde oriental de la Sierra de Aliste. Las ignimbritas muestran una compactación media y están constituidas principalmente por fragmentos pumíceos, tamaño lapilli grueso a ceniza, inmersos en una matriz de ceniza fina blanca.

Edad. Se tienen tres edades K/Ar en biotita y una en roca total de fragmentos pumíceos de flujos ignimbríticos comprendidas entre 22 y 23,5 Ma. De acuerdo a estos antecedentes y sus relaciones estratigráficas se asigna esta unidad al Oligoceno Superior-Mioceno Inferior.

2.1.1.4 Estratos de Sierra de Aliste (Misa, Mioceno Inferior)

Definición y relaciones estratigráficas. Secuencia volcánica y sedimentaria, continental, constituida por una sucesión de depósitos de bloques y ceniza, que localmente muestra una reducida intercalación sedimentaria de rocas clásticas y lacustres, hacia el techo de la secuencia. Ésta se encuentra plegada de manera moderada a intensa, en particular los niveles lacustres y cortada por numerosas fallas de rumbo NS. Sobreyace en discordancia de erosión a rocas de la Formación Pantanoso y a los Estratos de Río Juncalito, incluyendo una ignimbrita. Subyace a la Ignimbrita Vega Helada (Mioceno Inferior) y a las Gravas Aterrazadas del Mioceno Superior-Plioceno.

Litología. La secuencia se subdivide en tres distintas facies de acuerdo a la composición de los productos que predominan: volcánica, sedimentaria clástica y sedimentaria lacustre. Estas facies engranan parcialmente.

a) La facie volcánica está principalmente constituida por depósitos de bloques y ceniza, con una matriz mediana a débilmente soldada. Los bloques son de color gris, en general redondeados y alcanzan hasta 2 m de diámetro. Muestran vesicularidad variable, frecuentemente bandeamiento de flujo y ocasionalmente, diaclasamiento prismático y estructuras de corteza de pan. Petrográficamente corresponden a dacitas de textura porfídica gruesa a media.

b) La facie sedimentaria clástica corresponde a gravas, conglomerados y niveles más finos, bien estratificados, medianamente a bien consolidados, con escasos lentes carbonatados. En forma subordinada afloran areniscas y lutitas, comúnmente rojas. Corresponden a depósitos polimícticos, con fragmentos subangulares a redondeados, principalmente de dacitas de los depósitos de bloques y ceniza, andesitas negras, pórfidos de hornblenda y, de tobas soldadas, pórfidos y granitoides del Paleozoico Superior-Triásico.

c) La facie lacustre continental se dispone sobre los depósitos clásticos, y corresponde a una secuencia con niveles químicos y evaporíticos, de color blanquecino, formada por bancos delgados, con consolidación leve a nula. Corresponden a calizas, calizas sucias, niveles yesíferos, alternancia de lutitas finas, laminadas y depósitos blancos pulvulentos e intercalaciones de chert rojizo. Por su mayor dureza destaca un nivel calcáreo con un depósito algal en el techo.

Edad. Se registran 4 edades K-Ar en roca total de dacitas de depósitos de bloques y ceniza de esta unidad, siendo la más consistente con la estratigrafía la de $20,7 \pm 0,8$ Ma.

2.1.1.5 Ignimbrita Laguna Verde (Piilv, Plioceno Inferior)

Definición y relaciones estratigráficas. Extenso depósito de flujo piroclástico riolítico formado por, al menos, cuatro unidades de flujo con intercalaciones de niveles de oleada piroclástica y algunos niveles de tonalidad rojiza. Localmente se encuentra cubierta por depósitos pliocenos de gravas.

Litología. Petrográficamente, las cuatro unidades de flujo son muy similares entre sí, y están constituidas por proporciones variables de fragmentos juveniles pumíceos tamaño lapilli medio a bomba (5-40% vol., < 25 cm de diámetro); fragmentos líticos (<15% vol., hasta 20 cm de diámetro) subredondeados a angulosos, esencialmente de dacitas y andesitas, inmersos en una matriz fina ligera a fuertemente compactada. Es común la presencia de pipas de segregación gaseosa y estructuras de disyunción columnar. Las unidades de flujo presentan espesores variables, con máximos individuales de 20 m. En numerosos sectores se desarrolla un nivel rojizo hacia la base de la unidad de flujo superior, el que presenta también un mayor grado de compactación. También se ha observado, al menos dos niveles de oleada piroclástica intercalados entre las distintas unidades de flujo.

Edad. Se registran 10 dataciones radiométricas K-Ar en biotita contenida en las pómez, que permiten asignar este depósito al Plioceno Inferior.

2.1.1.6 Complejos volcánicos y estratovolcanes (Psv, Plioceno Superior)

Definición y relaciones estratigráficas. Conjunto de volcanes mixtos, con productos de composición principalmente andesítica y, en menor proporción, dacítica y riolítica. Es común que constituyan parte del basamento de los edificios volcánicos cuaternarios.

Litología. Están constituidos principalmente por lavas, andesíticas a dacíticas, con superficies suavizadas por la erosión, las que conservan aún ciertos rasgos primarios (lóbulos de avance) y, en menor proporción, riolíticas. También afloran en la zona lavas basálticas, depósitos de caída proximales y depósitos de flujo de detritos volcánicos. Las distintas facies, se agrupan de la siguiente forma:

- a) Predominantemente lavas
- b) Depósitos de flujo de detritos volcánicos
- c) Depósitos piroclásticos de caída proximal
- d) Lava riolítica
- e) Domos dacíticos
- f) Depósitos de flujo piroclástico

Edad. Se tienen 15 dataciones radiométricas K-Ar comprendidas entre $1,7\pm 0,5$ y $3,5\pm 0,7$ Ma, para diversos productos de estos edificios, que permiten asignarlos al Plioceno Superior.

2.1.1.7 Complejos volcánicos y estratovolcanes (PIHv, Cuaternario)

Definición y relaciones estratigráficas. Corresponden a centros de emisión, lavas, domos y depósitos piroclásticos de flujo y caída, los que presentan morfologías primarias como levées, canales centrales, lóbulos de avance, etc., en general, muy bien conservadas. Predominan los estratovolcanes compuestos y los complejos de domos y lavas-domo, básicamente con productos de composición dacítica.

Litología. Los productos varían de andesitas de piroxeno, anfíbola y/o piroxeno, a dacitas de biotita y anfíbola. En los complejos de domos, predominan estas últimas.

- a) Predominantemente lavas, De espesor variable, alcanzan más de 80 m de espesor en algunos casos, con morfologías tipo aa y bloques bien conservadas, y desarrollo de levées laterales, canales centrales y lóbulos frontales y de avance.
- b) Domos
- c) Depósitos de bloques y ceniza
- d) Depósito de caída pumíceo
- e) Depósito de abloques y ceniza del volcán Fraile
- f) Depósito de avalancha volcánica
- g) Depósitos laháricos del volcán Falso Azufre
- i) Conos de piroclastos y lavas asociados

Edad. Se tienen edades radiométricas K-Ar y Ar-Ar, comprendidas entre 1,6 y 0,18Ma, que permiten asignar este conjunto de centros volcánicos al Cuaternario, y señalar que la actividad volcánica en el área ha sido continua durante este período.

2.1.1.8 Depósitos aluviales antiguos (Pa, Plioceno)

Depósitos de gravas aterrazadas polimícticas, su origen es principalmente aluvional, alcanza hasta 8 m de espesor. Presenta una superficie suave y, en sectores, se encuentran afectadas por fallas normales y suaves pliegues. Están conformados por

fragmentos principalmente de origen volcánico, y en menores cantidades, de basamento subredondeados, inmersos en una matriz arenosa, con rasgos de laminación paralela y en menores sectores cruzada.

2.1.1.9 Depósitos aluviales y coluviales indiferenciados (PI)

Brecha Depósitos de escombros de falda de cerros, conos de deyección y relleno de quebradas y valles, polícticos, de mala selección y de baja madurez, con fragmentos de hasta 1m de diámetro inmersos en una matriz de arena gruesa. Su superficie se presenta suavizada por la erosión y, en los valles, se reconoce levemente peneplanizado. Se presentan disecados o cubiertos por los cauces y conos de deyección recientes.

2.1.1.10 Depósitos glaciares (PIHg, Pleistoceno - Holoceno)

Brecha polimíctica a monomíctica no consolidada, constituida esencialmente por fragmentos de dacitas y andesitas de tamaño variable y angularidad creciente con el tamaño, inmersos en una matriz de limo-arena. Se incluye los depósitos periglaciares reconocidos en la base de flancos abruptos de domos y volcanes.

2.1.1.11 Depósitos coluviales (PIHc, Pleistoceno - Holoceno)

Fragmentos sueltos que se disponen en la falda de los cerros y relleno de quebradas, con poco transporte, esencialmente gravitacional.

2.1.1.12 Depósitos aluviales y coluviales (PIHac, Pleistoceno - Holoceno)

Depósitos no consolidados de limo, arena, ripio y gravas, asociados a sistemas de drenaje y taludes activos, que constituyen los cauces, conos de deyección y relleno de valles y quebradas actuales. Corresponden a depósitos polimícticos a monomícticos (depósitos de relleno de quebradas y coluvio con poco transporte y depósitos de corrientes de barro), mal seleccionados y pobremente estratificados.

2.1.1.13 Depósitos aluviales (PIHa, Pleistoceno - Holoceno)

Depósitos no consolidados que forman los cauces recientes de quebradas y valles de escorrentía intermitente.

2.1.2 Geología estructural

En la zona de estudio se reconoce, al menos, dos dominios estructurales con distintos estilos de deformación. El dominio occidental afecta las unidades que forman la Cordillera de Claudio Gay. En este sector, se reconocen fallas inversas de alto ángulo y de rumbo NS, que constituyen el rasgo morfoestructural de primer orden, ya que monta unidades Paleozoicas - Triásicas sobre unidades del Oligoceno -Mioceno por medio y de vergencia tanto al oeste como al este. Estas fallas están cubiertas por lavas andesíticas de la parte superior de los Estratos de Claudio Gay, lo que indicaría que este período de deformación

estaría comprendido entre los 26 y los 20 Ma. Probablemente durante este mismo evento, estos estratos fueron deformados, resultando en suaves pliegues con ejes de orientación NS a NNE, de poca amplitud y gran longitud de onda. El dominio oriental comprende a los edificios volcánicos del Mioceno superior al Cuaternario y a depósitos sedimentarios del Plioceno-Pleistoceno-Holoceno. En esta zona, la deformación es de carácter frágil y está representado por numerosas fallas de extensión, que afectan a lavas, domos, cráteres y depósitos aluviales y coluviales; y por las fracturas orientadas E-W, evidenciadas en el emplazamiento de centros de emisión, principalmente en los aparatos volcánicos cuaternarios. La expresión superficial de las fallas corresponde a pequeños escarpes de falla o a fotolineamientos, que en algunos casos disectan unidades de lava, domos o centros de emisión.

2.2 Geología Colpitas

La recopilación de información se efectuó a partir del levantamiento geológico hecho por AURUM-EASA. Esta información se sintetiza en la siguiente descripción de las unidades geológicas y de las estructuras de la zona.

2.2.1 Unidades Geológicas

En la zona de estudio afloran unidades principalmente volcánicas, estratificadas, en secuencias o en grandes edificios volcánicos y unidades sedimentarias no consolidadas, predominantemente clásticas (Mapa geológico local, Anexo B.2). El rango de edades está comprendido entre el Oligoceno superior-Mioceno inferior y el Holoceno. Adicionalmente aflora un cuerpo intrusivo subvolcánico de edad miocena media.

Las unidades, ordenadas de más antigua a más joven, se detallan a continuación:

2.2.1.1 Formación Lupica (OMI, Oligoceno Superior-Mioceno Inferior)

Definición y relaciones estratigráficas. La secuencia está constituida por rocas volcánicas y sedimentarias. Es importante notar que esta unidad en general muestra estratificación vertical, con rumbos variables NS y NW y con un espesor estimado de 1500 a 2000 m.

Litología. La secuencia está constituida por lavas andesíticas y dacíticas, brechas y tobas ignimbríticas, dacíticas a riolíticas, con intercalaciones de rocas sedimentarias (brechas, areniscas, conglomerados, fangolitas y calizas). Está descrita como asociación de 4 facies García et al. (2004):

- a) Lavas y brechas en la parte inferior
- b) Ignimbritas y rocas sedimentarias en la parte media
- c) La Ignimbrita del Cordón Belén
- d) Rocas sedimentarias en la parte superior

En la zona de este estudio se reconoció principalmente la facie de lavas (a). La litología predominante corresponde a andesitas de piroxeno pardas, gris verdoso oscuro, pardo verdosas y subordinadamente violáceas, intensamente fracturadas, diaclasadas o lajadas.

Edad. Se han reportado distintas edades en distintas facies. Se dispone de una edad K-Ar en biotita en una toba riolítica, entregando una edad de $24,2 \pm 0,7$ Ma (AURUM-EASA). También se cuenta con edades K-Ar, Ar-Ar que muestran un valor entre 25,7 y 21,2 Ma (García et al., 2004), Oligoceno Superior- Mioceno Inferior, para la facie inferior de lavas (a). Así como también se tienen datos de para la facie de ignimbritas y rocas

sedimentarias de la parte media, con una edad entre 23,1-18,7 Ma (García et al., 2004), Mioceno Inferior.

2.2.1.2 Lavas del Mioceno Superior (Msv, Mioceno Superior)

Definición y relaciones estratigráficas. Secuencia constituida por coladas de lava no individualizables. Sus centros de emisión se ubican hacia el sur y corresponden a estratovolcanes erosionados, alineados NNW. Afloran en el extremo sur del área de estudio. Sobreyacen a los estratos plegados de la Formación Lupica y subyacen a la Ignimbrita Lauca del Plioceno Superior.

Litología. Las lavas corresponden a andesitas de piroxenos. Se presentan como coladas en bloque erosionadas, comúnmente oxidadas, con escasos rasgos originales preservados, sólo observables en imágenes aéreas. Muestran bandeamiento de flujo incipiente.

Edad. Se dispone de 4 edades K-Ar en lavas de esta unidad. En uno de sus centros de emisión se obtuvieron edades de $5,5 \pm 0,2$ y $8,2 \pm 0,4$ Ma (García et al., 2004), mientras que en el otro se obtuvieron valores de $6,5 \pm 0,3$ y 10 ± 1 Ma (García et al., 2004). Estos valores permiten asignar esta unidad al Mioceno Superior, además de sugerir una larga evolución para estos complejos volcánicos, de entre 3 y 5 Ma.

2.2.1.3 Ignimbrita Lauca (Pil, Plioceno Superior)

Definición y relaciones estratigráficas. Depósito de flujo piroclástico riolítico, medianamente soldado y de gran volumen que aflora en la parte centro (de forma restringida en el área del Bofedal Colpitas) y sur del área de estudio. La Ignimbrita Lauca rellena depresiones morfológicas y valles labrados en la Formación Lupica, sobre la cual aflora en parches discontinuos. Sobreyace en discordancia angular, a la Formación Lupica, al Pórfido Colpitas y a lavas del Mioceno superior y subyace a la Formación Huaylas. Alcanza un espesor máximo de 70-80 m en sectores de la quebrada Allane y en sus afloramientos orientales, aunque comúnmente varía entre 20 y 40 m de espesor.

Litología. Constituida por una toba mediana a pobremente soldada, de composición dacítica compuesta predominantemente por cenizas, con proporciones variables de cristales, pómez y líticos. En el área de estudio se observa como un cuerpo macizo, con base débil a medianamente soldada que grada a un sector con diaclasamiento columnar incipiente, ambas parte de una sola unidad de flujo. La zona con diaclasamiento columnar comúnmente muestra alteración de fase vapor con pómez levemente alteradas, disgregables y negativas.

Edad. En la zona de estudio no se dispone de antecedentes geocronológicos para esta unidad. Sin embargo, García (et al., 2004) compila datos de dataciones con métodos K-Ar y Ar-Ar, que muestran un rango entre 2,8 y 2,6 Ma para la cristalización-erupción de esta ignimbrita.

2.2.1.4 Formación Huaylas (PPIh, Plioceno-Pleistoceno)

Definición y relaciones estratigráficas. Secuencia sedimentario-volcánica continental muy extensa, que rellena depresiones en la Precordillera y la Alta Cordillera. Aflora en el centro del área de estudio y su disposición es prácticamente subhorizontal. Se dispone en discordancia sobre la Formación Lupica, sobreyace al Pórfido Colpitas, a la Ignimbrita

Lauca y engrana con los productos de los estratovolcanes del Plioceno y Pleistoceno. Subyace a depósitos morrénicos (Plg), el producto de su retrabajo (PIHg) y a diversos depósitos no consolidados del Holoceno (Ha, Hac, Hfa). Normalmente el techo de la unidad corresponde a la superficie de erosión, caracterizada por la acumulación de bloques redondeados de dacita, interpretados como remanentes de la erosión de depósitos de bloques y ceniza. En la proximidad de los volcanes, esta unidad está frecuentemente cubierta por un nivel delgado de depósitos aluviales producto del retrabajo de las morrenas, en cuyo caso se representa cartográficamente como Fm. Huaylas.

Litología. Secuencia volcanoclástica, volcánica y subordinadamente sedimentaria clástica poco potente (algunos metros a un máximo de 70 m de espesor en Qda. Allane), caracterizada por variaciones de facie laterales y verticales. Incluye tobas líticas no soldadas, depósitos de bloques y cenizas, conglomerados semiconsolidados, areniscas, gravillas e intercalaciones locales de lavas brechizadas.

Edad. No se cuenta con datos geocronológicos para esta unidad, pero se le asigna al Plioceno superior-Pleistoceno por dos razones: cubre la Ignimbrita Lauca del Plioceno superior; engrana con los productos volcánicos de los volcanes Cosapilla, Copatanca y Curicagua, que están asignados al Plioceno-Pleistoceno.

2.2.1.5 Volcán Copatanca (PPlvcop, Plioceno Superior-Pleistoceno)

Definición y relaciones estratigráficas. Edificio volcánico compuesto y mixto ubicado en la parte Norte del área de estudio. Estaría formado por, al menos, dos conos y los remanentes de un cono más antiguo y de menor altura al este. Si bien los edificios se presentan fuertemente erodados, es menos que los restantes volcanes del área. La erosión glacial disectó los conos dejando parcialmente expuesta la alteración hidrotermal en el núcleo de estos, en particular en el cono NE. El volcán está constituido por coladas pobremente preservadas, raramente individualizables, con escasos rasgos superficiales originales. Además de coladas, el Copatanca incluye domos, sólo unos de los cuales, ubicado en su flanco norte, pudo ser individualizado. Domos más jóvenes se reconocen en su flanco sur y norte y describen en una unidad independiente (Domos de Suriplaza).

Litología. Las lavas del complejo volcánico Copatanca corresponden exclusivamente a dacitas y daciandesitas de hornblenda y biotita; coladas en bloque, de superficie rojiza y color gris medio. Son de grano medio a grueso y comúnmente ricas en fenocristales. Intercalados entre las lavas se presentan depósitos piroclásticos (brechas, tobas líticas y de lapilli, tobas de ceniza y cristales) principalmente expuestos en el núcleo alterado.

Edad. No existen antecedentes geocronológicos para este volcán, pero dadas sus relaciones estratigráficas se le asigna tentativamente una edad pliocena superior-pleistocena.

2.2.1.6 Depósitos glaciales (Plg, Pleistoceno)

Definición y relaciones estratigráficas. Depósitos detríticos no consolidados, mal seleccionados y masivos de origen glacial (morrenas). Los ápices de los depósitos de las morrenas alcanzan hasta 5.050 m de altura, aunque predominan bajo los 4.900 m. Forman llanuras onduladas de superficie amorillada irregular (textura agusanada), con marcados cordones morrénicos arqueados y lóbulos en los flancos medio e inferiores. Corresponden a morrenas laterales, terminales y de retroceso en que los cordones morrénicos marcan el emplazamiento de las fases de detención durante la retirada del hielo.

Litología. Corresponden a depósitos no consolidados, aunque levemente endurecidos, oligomícticos a polimícticos, mal seleccionados, matriz soportados, de bloques y gravas inmersos en matriz limo-arenosa, sin estructuras sedimentarias internas (“till”). Los clastos corresponden exclusivamente a rocas volcánicas del edificio que están cubriendo, incluyendo fragmentos de rocas alteradas con alteración argílica.

2.2.1.7 Depósitos glaciales retrabajados (PIHgac, Pleistoceno-Holoceno)

Depósitos no consolidados de origen aluvial y subordinadamente fluvial, originados por el retrabajo de depósitos glaciales. Se incluyen tentativamente en esta unidad los delgados depósitos de gravas ricos en matriz que cubren parcialmente la Ignimbrita Lauca al sur de la quebrada Allane.

Los depósitos glaciales retrabajados corresponden a depósitos con material detrítico de mayor esfericidad y redondeamiento que las morrenas, donde la acción aluvial y fluvial ha removido y parcialmente destruido el diseño estrictamente glacial del depósito original. Forman llanuras de acumulación de pendiente suave.

2.2.1.8 Glaciares de roca (Hgr, Holoceno)

Geoformas mixtas glaciogénicas y de remoción en masa, de forma lenguada o lobulada, con estrías de flujo superficiales y evidencias de movimiento reciente. Corresponden a masas de detritos angulosos, pobremente seleccionados, en forma de lengua o lobulada, con hielo en su interior, que se mueve ladera abajo. El hielo puede estar intersticial, “cementando” los detritos, o como un núcleo de hielo macizo cubierto por los detritos. Aquellos con núcleo de hielo se consideran parte del sistema glacial en tanto los que presentan hielo intersticial se clasifican como morfologías periglaciales, características de ambientes de permafrost (Gutierrez, 2008).

En el área de estudio, los glaciares de roca se reconocen al pie de paredes escarpadas que corresponden a los anfiteatros de circos glaciares o a laderas abruptas de valles en artesa (“U”). Se alimentan en su zona de arranque de clastos procedentes de depósitos de talud (coluvios) generados por la acción de la crioclastia que construyen conos de derrubios con los cuales engranan los depósitos de Hc y Hac.

2.2.1.9 Depósitos coluviales modernos (Hc, Holoceno)

Depósitos monomícticos, de bloques angulosos, con escasa matriz, generados por gelifracción y/o avalanchas de nieve en laderas de pendiente fuerte de origen glacial, generalmente en la falda de volcanes. Pasan gradualmente a glaciares de roca o a depósitos aluviales. Se incluye en esta unidad las acumulaciones de derrubios en forma de festón (lóbulos angostos) depositadas en la base de pendientes fuertes de circos glaciares y artesa, indiferenciables de glaciares de roca de margen de valle.

2.2.1.10 Depósitos aluviales modernos y fluvio-aluviales (Ha-Hfa, Holoceno)

Sedimentos no consolidados, policomposicionales formados por gravas, arenas, arcillas y limos generados por depósitos de flujos de detritos relacionados con corrientes de barro y/o avenida, asociados al sistema de drenaje más joven. Pasan gradualmente a depósitos coluviales y a depósitos fluvio-aluviales. Los depósitos fluvio-aluviales se asocian a sistemas de drenajes angostos, activos principalmente en temporada de lluvias.

2.2.2 Geología Estructural

El área de Colpitas se encuentra inserto en el sistema estructural Altiplánico, de orientación NW-SE (Tibaldi et al., 2008). La deformación que afectó a esta zona fue de estilo compresivo (García et al., 2004) y está representada por el fuerte plegamiento de la Formación Lupica, por la discordancia que separa a esta unidad de la cobertura volcano-sedimentaria y por fallas de menor desplazamiento.

En la zona de Colpitas es difícil reconocer rasgos estructurales, puesto que la cobertura volcánica oblitera las eventuales estructuras de las rocas del basamento. En esta cobertura, las estructuras son sutiles, por lo que las tendencias estructurales son inferidas por escarpes alineados, en especial en la zona del bofedal de Colpitas.

Principales rasgos estructurales:

Plegamiento Formación Lupica. Se reconoce una geometría similar al sistema de cabalgamientos y pliegues de vergencia oeste, que limita con la Cordillera Principal por el oeste. En esta unidad predominan los estratos subverticales o de fuerte manteo (65-80°W), orientados N20E a N20W, que forman un monoclinial de manteo subvertical a 65-80° al oeste.

Fallas y lineamientos. Se reconocen 4 tendencias estructurales, dado por deformación de estilo compresiva del Mioceno-Holoceno, representado por fallas y potenciales fallas. La principal orientación es NW-NNW, y coinciden con el sistema altiplánico. Aunque también se identifican orientaciones NS, EW y NNE, pero son menos frecuentes.

Sistema de fallas inferidas y lineamientos en Bofedal de Colpitas, tienen una orientación preferente NW que afecta a la Formación Huaylas y a la Ignimbrita Lauca. Se distribuyen como una franja de 4 km de ancho y 3,5 km en dirección paralela al rumbo, con estructuras N20-40W, de 1 a 2,5 km de longitud, a las cuales se les asocian manifestaciones termales en el área.

Capítulo 3. Mediciones y metodología

En este capítulo se explica cuáles fueron las mediciones y muestras utilizadas en el estudio y cuál fue la metodología para obtenerlas.

3.1 Mediciones y muestras

En este estudio, las mediciones corresponden a registros de concentraciones de CO₂-DDS, con un total de 784 puntos en Juncalito y 551 puntos en Colpitas. Estas fueron efectuadas con el sistema de cámara de acumulación (SCA). En tal sistema, las mediciones de concentraciones de CO₂ son realizadas a través de un detector infrarrojo de gases, conocido genéricamente como IRGA (Infra-red gas analyzer). Las mediciones efectuadas en terreno tienen resultados en tiempo real y representan concentraciones puntuales de CO₂-DDS en el espacio. Junto con estas mediciones, fueron registradas las variables ambientales: temperatura del suelo (10 cm de profundidad aproximadamente) y del aire, humedad del suelo, velocidad del viento, presión atmosférica. Para esto se utilizaron: termocupla, medidor de humedad de suelo, y estación meteorológica portátil. Estas variables fueron medidas con el fin de correlacionar las variaciones de estos parámetros con las variaciones de CO₂-DDS. Para realizar las mediciones se debe seguir un protocolo que toma alrededor de 5-8 minutos en total, considerando mediciones de CO₂-DDS, de parámetros ambientales y anotaciones particulares sobre el terreno.

Para Juncalito, se cuenta con análisis químico de muestras de agua y dos de gases, colectadas por la empresa EASA. Se tomaron muestras de manantiales termales, de manantiales fríos con posible influencia termal y por último, de vertientes frías y escorrentías superficiales. También se dispone de muestras de precipitados salinos analizados por difracción de rayos X (DRX) en puntos cercanos a las surgencias de aguas termales. Las muestras de gases corresponden a gases libres de dos manantiales termales. La ubicación de estas muestras y de los puntos de medición de CO₂-DDS se ilustra en la figura 3.1.

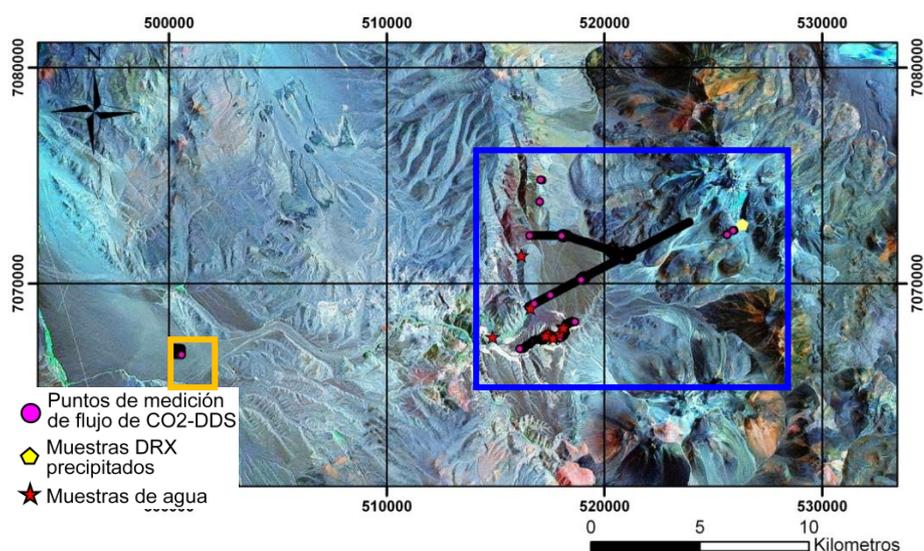


Figura 3.1. Ubicación muestras de aguas, de precipitados minerales y puntos de medición de CO₂-DDS, sobre imagen LANDSAT. En recuadro azul se señala sector de

Llano Los Cuyanos. En recuadro naranja se señala sector de Pampa la Ola (correspondiente a la línea base).

En el caso de Colpitas, también se cuenta con análisis químico de muestras de agua y dos de gases, colectadas por la empresa EASA. Se tomaron muestras de manantiales termales, de manantiales fríos con posible influencia termal, de vertientes frías y escorrentía superficial. Las muestras de corresponden a gases libres de dos manantiales termales. Uno en la zona norte y otro en la zona sur del área del Bofedal de Colpitas. La ubicación de estas muestras y de los puntos de medición de CO₂-DDS se ilustra en la figura 3.2.

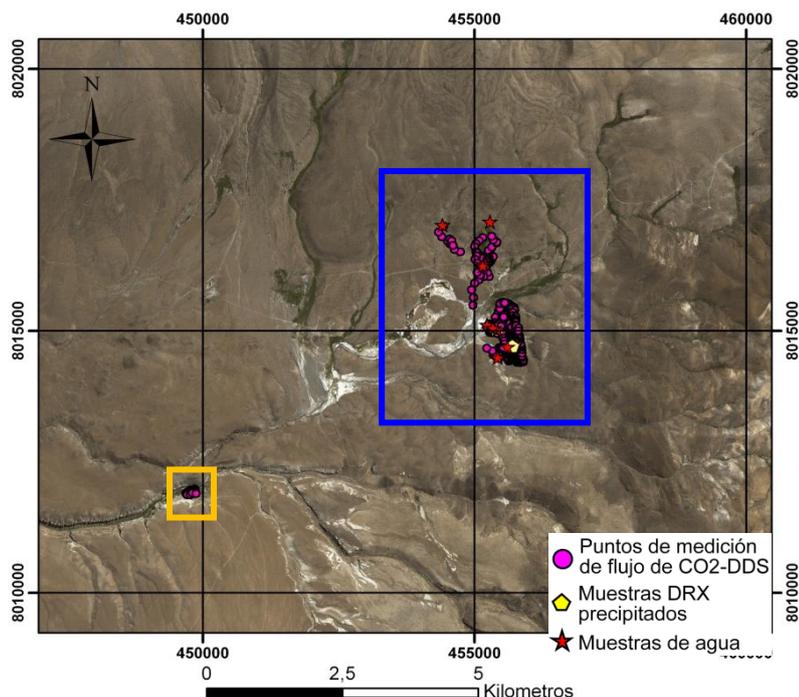


Figura 3.2. Ubicación muestras de aguas, de precipitados minerales y puntos de medición de CO₂-DDS, sobre imagen SPOT. En recuadro azul se señala sector Bofedal de Colpitas. En recuadro naranja se señala sector de Bofedal de nivel base.

3.1.1 Criterio de selección de área de interés

3.1.1.1 Juncalito

En primer lugar, se identificaron zonas de potenciales anomalías previo a la medición en terreno. En particular, a partir de los antecedentes geológicos (mapa geológico preliminar), se identificaron estructuras y lineamientos que potencialmente podrían funcionar como canales para el ascenso de CO₂ desde una fuente profunda. Así es como se decidió trazar un perfil ortogonal a la estructura de primer orden en la zona, de carácter NS. Luego, se decidió trazar un segundo perfil a lo largo del Río Negro, debido a que los manantiales termales afloran en distintos puntos del río, pudiendo indicar permeabilidad estructural, que favoreciera el ascenso de CO₂. Finalmente, un tercer perfil fue definido sobre una zona de baja resistividad (bajo Llano Los Cuyanos) indicada por los

resultados de un análisis de MT, pudiendo indicar ascenso de fluidos en esa zona, incluyendo CO₂ (fig 3.1).

Luego, en una segunda campaña, se realizaron 4 grillas ubicadas en torno a los puntos de mayores concentraciones encontradas en la primera campaña. Esto ocurrió en el sector de "Llano Los Cuyanos". Finalmente, se realizó una tercera campaña, con el fin de tener una grilla que mostrara las concentraciones de un nivel base. Para esto se escogió una pampa con condiciones geológicas similares, pero a una distancia considerable de las anteriores, en este caso 18 Km aprox., debido a que se buscó que no tuviera influencia del sistema geotermal. Fue nombrada como "Pampa la Ola" (fig. 3.1). Además, en la tercera campaña se realizaron medidas de CO₂-DDS sobre los puntos de interés registrados en las campañas previas. Su objetivo era identificar si existía variación diurna de las concentraciones de CO₂-DDS. Estas mediciones fueron efectuadas aproximadamente cada 30 minutos, durante un ciclo diurno de casi 8 horas (horas de luz). Esto fue realizado en 3 puntos. Para ello, primero se midió en el punto de anomalía registrado en campañas anteriores, si la anomalía no persistía, se medía en el entorno hasta encontrar un valor similar al de la anomalía. Si aún así no se registraba un dato de magnitud similar, entonces se procedía a medir en el punto original y a registrar la variación.

3.1.1.2 Colpitas

En el caso de Colpitas, también se identificaron zonas de potenciales anomalías, previo a la medición de terreno. En particular, las zonas cercanas a las manifestaciones termales, además de sectores con calicatas (excavaciones efectuadas de 0,5-2m de profundidad con el objetivo de extraer minerales) encontradas en el bofedal sur. En una primera campaña, se realizaron mediciones cerca de estos lugares siguiendo un perfil de orientación NNW-SSE, dado por lineamientos geomorfológicos en la zona, que coincidían con la orientación de las calicatas. De esta forma se identificaron anomalías y luego se realizaron mediciones en forma de grilla en torno a éstas. En el sur se encontró una mayor concentración de anomalías. Por esta razón, se realizó una grilla en este bofedal en una segunda campaña. Se plantearon grillas de medición con un espaciamiento de 30x30 m². Sin embargo, en la práctica, ésta varió entre 30x30 y 42x42 m² por encontrar sectores con muy bajas concentraciones de CO₂-DDS.

3.2 Metodología

3.2.1 Metodología CO₂-DDS

3.2.1.1 Metodología de cámara de acumulación

El sistema de medición consta de los siguientes componentes: cámara circular invertida de altura 9,9 cm, superficie 326,85 cm², y volumen 3,24 L; espectrofotómetro infrarrojo o analizador infrarrojo de gases (IRGA); tubos plásticos, filtros y bomba de aire; convertidor de señal análoga a digital; computador portátil o palm; batería eléctrica de 12 V (Chiodini et al., 1998; Fridriksson et al., 2009).

El detalle y función de los componentes se entrega a continuación:

- El detector IRGA de CO₂ LI-820, es un analizador de una vía, de doble longitud de onda, no dispersivo. Entrega una concentración absoluta de CO₂ en ppm con una frecuencia mínima de 0,5 segundos. Esta concentración es función de la absorción de energía infrarroja cuando ésta pasa a través del lector óptico. El algoritmo del equipo, además corrige la concentración de CO₂ con los datos de presión y temperatura internas. La exactitud del sistema de acumulación está estimada en 12,5% debido a la alteración del flujo de gas por el bombeo del sistema (Evans et al., 2001, extraído de Lewicki et al., 2005). La precisión es +/- 10% (Chiodini et al., 1998, extraído de Lewicki et al., 2005).
- Los filtros son 2. El primero, sirve para eliminar partículas de polvo, proporcionado por LICOR. El segundo compuesto por sales de sílica gel, tiene por objetivo eliminar la humedad del gas que ingresa al detector, ya que puede dañarlo y ocasionar interferencia analítica por condensación de agua.
- La bomba de aire es catalogada como microbomba de diafragma con un caudal de 0.8 l/min. y alimentación de 5 V DC. Su función es hacer circular continuamente el aire desde la cámara hasta el analizador de CO₂.
- El computador portátil de terreno es un Tablet PC Rugged con GPS, de Trimble, su modelo es Yuma. Se utilizó el software creado por la empresa LICOR, software de comunicación LI-820 820-5000, para registrar y transferir los datos desde el analizador hasta el computador (Manual LI-820).
- La batería eléctrica debe ser de 12 V y 12 Ah de corriente continua, capaz de entregar energía al analizador y a la bomba de aire durante todo un día de medición.

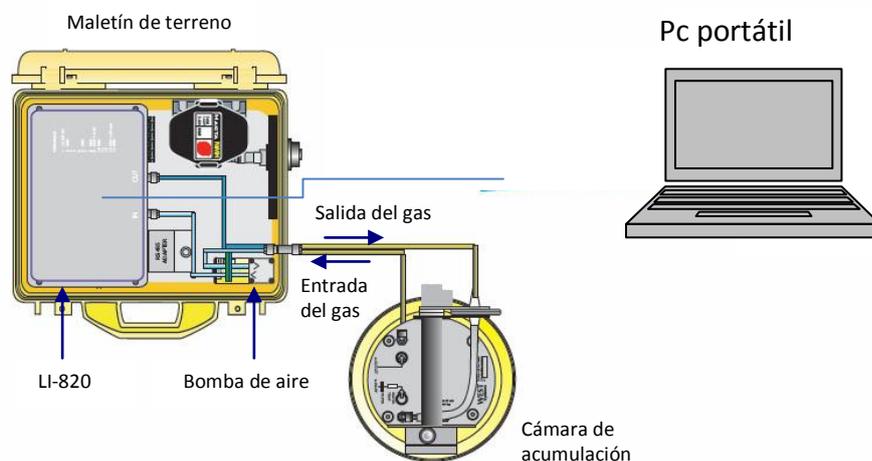


Figura 3.3 Sistema de cámara de acumulación como medidor de concentraciones y flujo de CO₂. Visión en planta (extraído y modificado de www.westsystems.com/portable.html).

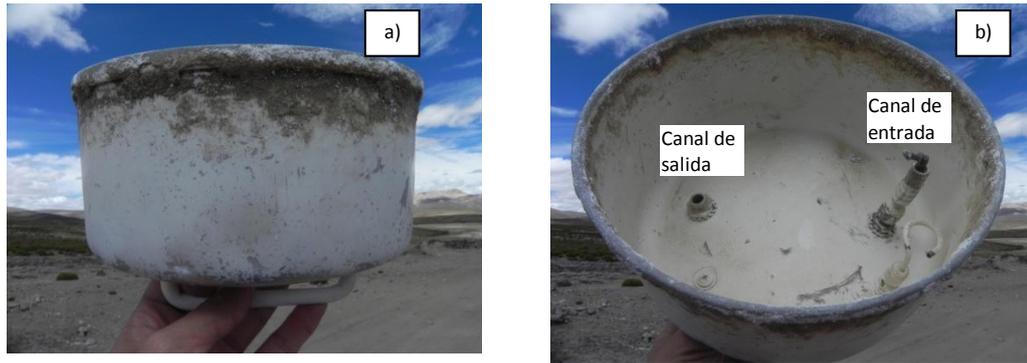


Figura 3.4. Cámara de acumulación. a) Vista de perfil b) Vista interna de la cámara

A continuación se describe cómo funciona el SCA: se tiene una cámara circular, la cual es colocada sobre el suelo, con su abertura hacia abajo; el aire dentro de la cámara es bombeado continuamente en un circuito cerrado, de forma que el aire va desde la cámara hasta el analizador infrarrojo y una vez medido, es devuelto a la cámara (fig. 3.3). Es necesario que la concentración de CO_2 en la cámara sea homogénea. Esto se consigue por medio de la configuración de ésta, que cuenta con el canal de entrada desde el detector IR más abajo que el canal de salida (fig. 3.4b). De esta forma, como el CO_2 es más denso que el aire, dentro de la cámara el aire se mezcla homogéneamente. El gas bombeado desde la cámara hasta el detector IR es reemplazado por aire atmosférico, que entra por un tubo capilar ubicado en la parte superior de la cámara (Chiodini et al., 1998). Este proceso ocurre sólo al principio de la medición, cuando la cámara es colocada en el suelo, para que la bomba no succione aire desde el suelo. Dicho de otra forma, su función es impedir que aumente la presión en el interior de la cámara al comienzo de la medición, igualando la presión interior de la cámara a la presión exterior, en este caso presión atmosférica. Este intercambio no ocurre después debido a que el aire es devuelto desde la cámara. El hecho de ocupar un capilar, asegura que la cantidad de gas que se intercambia sea despreciable. Mediante el software de LICOR, se realiza el registro continuo de las concentraciones de CO_2 con respecto al tiempo. Así, si existe emanación de CO_2 desde el suelo, su concentración irá en aumento (fig. 3.5). De otro modo, la concentración puede oscilar en torno a un nivel bajo, o bien, disminuir. Es importante notar que solo se puede calcular flujos de CO_2 -DDS cuando se registra un aumento de concentraciones de manera constante y lineal ($dC/dt > 0$). La concentración de CO_2 -DDS es medida en ppm.

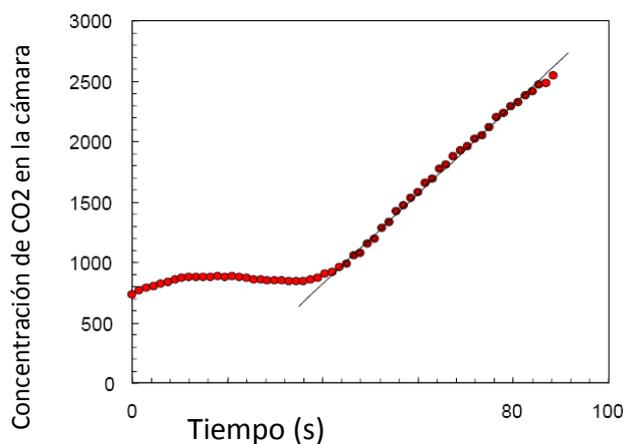


Figura 3.5. Gráfico que muestra la curva tipo de acumulación de CO_2 difuso desde el suelo en el tiempo (Fridriksson et al., 2009).

3.2.1.2 Protocolo de medición en terreno de CO₂-DDS

El protocolo de medición es similar al utilizado en la mayoría de los estudios. Primero que todo, se enciende el instrumento LI-820 y cuando éste alcanza los 50°C, temperatura óptima para el funcionamiento de la celda óptica, se enciende la bomba que comienza a extraer el aire desde la cámara. En ese momento se puede empezar a registrar los datos con el software.

El protocolo se puede separar en 3 partes, dura aproximadamente 4 minutos y se registran datos con 1 segundo de frecuencia. Primero, medición de CO₂ del aire durante 30 segundos. Para ello se levanta la cámara en dirección al viento, tal que no tenga influencia del CO₂ exhalado por la persona que la sostenga (fig 3.6a, fig. 3.7a). Luego, se mide la concentración de CO₂ desde el suelo, para ello se presiona firmemente la cámara contra el suelo y se cubre los bordes con el sedimento suelto de alrededor (fig 3.6b-c, fig. 3.7b). La finalidad de este procedimiento es sellar el sistema y que no haya infiltración desde la atmósfera para que no afecte la medición, en especial en días con viento (Chiodini et al.,1998). Se registran datos hasta por 3 minutos. Cabe señalar que la concentración de CO₂ es función del tiempo de medición (en caso de existencia de flujo desde el suelo), por lo tanto, el tiempo puede variar. La condición es que debe ser suficiente para mostrar un patrón lineal de incremento en las concentraciones y puede tener como mínimo un minuto. Finalmente, se mide nuevamente la concentración del CO₂ atmosférico por 30 segundos (fig. 3.6d, fig. 3.7c).



Figura 3.6. Procedimiento de medida de CO₂-DDS. a) Medición de CO₂ atmosférico. b) y c) Colocar cámara de acumulación en el suelo para medir aumento de concentración de CO₂-DDS. d) Nuevamente medición de CO₂ atmosférico.

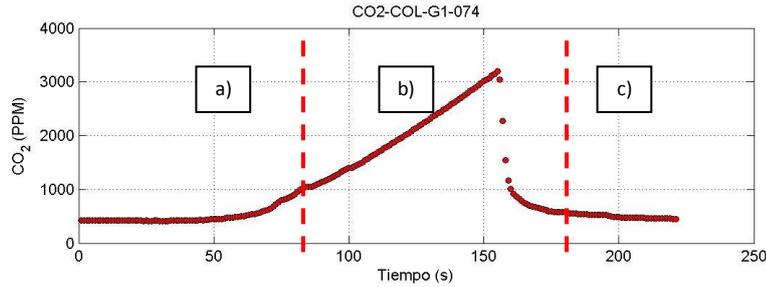


Figura 3.7. Gráfico de medición de CO₂-DDS de Colpitas. a) Primera medición de CO₂ atmosférico b) Registro incremento de concentraciones de CO₂-DDS c) Medición final de CO₂ atmosférico.

La medición del CO₂ atmosférico al comienzo y al fin se realiza con el objetivo de comprobar que el equipo está midiendo correctamente, debido a que se considera la concentración de CO₂ atmosférico como un estándar que no varía mayormente dentro de los 4 minutos de medición. El valor de la concentración estándar de CO₂ atmosférico es de 360 ppm (Lewicki et al., 2005), aunque puede variar por efectos de topográficos. Esto es de gran utilidad para evitar mediciones incorrectas cuando el voltaje de la batería disminuye. Además, sirve para se limpien las líneas, debido a que pueden quedar con exceso de CO₂, el cual podría ser registrado en la próxima medición.

Durante el proceso de medición de CO₂-DDS, es importante no remover la cobertura de suelo antes de realizar la medición, ya que puede generar un aumento en la tasa de flujo de salida de CO₂-DDS (Fridriksson et al., 2009). La medición será más confiable si se realiza sobre suelo en condiciones secas, debido a que la lluvia puede saturar los poros del suelo. Esto puede generar menores flujos de CO₂ mientras el suelo está húmedo, por disolución de este gas en agua, y también puede generar mayores flujos al secarse (Granieri et al., 2003; extraído de Fridriksson et al., 2009). Por lo tanto se prefiere realizar mediciones sobre un suelo que tenga condiciones secas por al menos 2 días.

Una limitación a considerar es que este método se debe utilizar solo en áreas donde el material superficial tenga una porosidad homogénea en la escala de la cámara. Por lo tanto, este método funciona bien en suelo orgánico, arena e incluso nieve, pero no sobre campos de lava fresca (Fridriksson et al., 2009).

3.2.1.3 Cálculo de flujo

El flujo de CO₂-DDS es calculado a partir de la tasa de incremento de la concentración de CO₂ en el tiempo (dC/dt) o gradiente; la presión atmosférica (P) medida con el detector interna de LICOR (automáticamente) y con estación meteorológica; temperatura atmosférica (T) medida con termocupla (estas últimas mediciones son registradas durante medición de CO₂-DDS); condiciones estándar atmosféricas T° = 298 K y P°= 101,3 kPa; la razón entre el volumen de la cámara (V) y la superficie de ésta (A) y un factor de conversión (k=169,34 m⁻³, Werner et al., 2000), que es necesario para convertir unidades, desde concentraciones [ppm/s] que mide el equipo, a la unidad convencional de flujo en este tipo de estudios [g m⁻² d⁻¹]. Según la ecuación (1) descrita por Werner (2000):

$$\varphi(CO_2) = k \left(\frac{P}{P^\circ} \right) \left(\frac{T^\circ}{T} \right) \left(\frac{V}{A} \right) \left(\frac{dC}{dt} \right) \quad (1)$$

El gradiente corresponde a la variación de la concentración en un intervalo de tiempo, que según el protocolo, tiene un rango de 60-210 segundos y considera sólo los gradientes positivos, es decir, los casos en que existe un incremento en las concentraciones de CO₂. Los valores negativos indican que la cámara tenía una mayor concentración al ser apoyada en el suelo y que no hay emisión de CO₂ desde éste. Estos casos fueron la minoría, pero se puede explicar por fuente antropogénica (respiración de quién sostiene la cámara) o porque la línea de medición quedó con una alta concentración desde la medición anterior. En terreno resulta difícil cumplir siempre con los rangos de tiempo exacto de medición. En la práctica, este intervalo se considera como aquel en que se reconozca un gradiente cuasi-constante mayor que 0, es decir, un incremento en las concentraciones de manera casi lineal. Para calcular ese gradiente con el gran número de muestras con que se contaba, se recurrió a un algoritmo de programación implementado en Matlab.

Básicamente consistió en leer el registro de concentraciones de CO₂-DDS versus el tiempo en cada punto, generando gráficos correspondientes. Luego, ubicar los tiempos importantes: primero, el tiempo en que ocurre el máximo de CO₂-DDS (t_{max}); seleccionar un tiempo t₁ (en general t₁=100s, pero para mediciones de menos tiempo se considero t₁=60 ó 80s) tal que en ese punto ya se tenga una relación lineal de incremento en las concentraciones (experimental). Después, la parte compleja consistía en identificar t₂, tal que en ese tiempo comience el incremento de concentraciones de manera lineal y casi constante. Para ello, el algoritmo tuvo que ser iterativo y cumplir con las siguientes condiciones: si la regresión lineal entre t_{max} y t₁ tiene un coeficiente de correlación superior a 0,9 (asegurando la linealidad), se amplía el intervalo en un segundo, dejando a t₁=t₁-1, pero además debe cumplir que al ampliar en un segundo el intervalo de tiempo, el gradiente nuevo no variara en más de un 15% con respecto al gradiente calculado previamente (porcentaje ajustado experimentalmente). Si no se cumplían estas condiciones entonces el intervalo considerado era de t₁ hasta t_{max}. Por otra parte, si R²< 0,9, incluso desde t₁=100 hasta t_{max}, entonces no entregaba una relación lineal, y por lo tanto el punto era descartado para el cálculo de flujo. En la mayoría de los casos este algoritmo entregaba un intervalo de tiempo adecuado. Los casos más complejos fueron: aquellos en que el máximo de CO₂-DDS se daba antes de los 30 segundos, o después de los 210 segundos, por bajas concentraciones en el suelo y a veces por contaminación antropogénica de quien sostenía la cámara o por cercanía a la camioneta de transporte; y también en los casos en que el máximo se daba antes de los 100 segundos, por variaciones oscilantes de CO₂-DDS. La solución fue crear un algoritmo para las excepciones tomando un t_{max}-fijo=145 y descartando el registro de los datos antes de los 30 segundos.

Cabe señalar, además, que como la medición de presión afecta al cálculo de flujo, al calcular el flujo con la presión entregada por el detector del LICOR no se tiene el mismo resultado que con la estación meteorológica. Esta variación no supera el 10%. Para efectos del cálculo se prefirió la utilización de la presión del detector, ya que esto disminuye la cantidad de parámetros a medir en terreno. Ésta fue registrada con la bomba encendida, y esto irremediablemente disminuye la presión dentro de la cámara alrededor de un 2 %, afectando en el mismo porcentaje al cálculo de flujo.

3.2.1.4 Trabajo estadístico de los datos

El método GSA (graphical statistical approach), según el trabajo de Chiodini et al. (1998), consiste en el análisis estadístico de los datos por medio de un histograma de flujo de CO₂-DDS y por un gráfico de probabilidades acumuladas. Con el primero de ellos se determina la distribución de los datos, que en el general de los estudios de este tipo coincide con una distribución lognormal con una o más modas. Luego, con el gráfico de probabilidades acumuladas se puede establecer la cantidad de poblaciones que existen dentro del espectro total de datos. En la práctica, se efectúan particiones de los datos con distintas distribuciones de flujos de manera visual. En particular para el CO₂-DDS, una sola población lognormal se grafica como una línea recta en un gráfico de probabilidad acumulada logarítmica; mientras que una distribución polimodal, que tiene un número n de poblaciones lognormales sobreponiéndose, genera una curva con n-1 puntos de inflexión (Chiodini et al., 2008).

El gráfico de probabilidades acumuladas se construye como un gráfico de frecuencias relativas acumuladas, en que las frecuencias de flujo de CO₂-DDS son divididas por el total de las muestras, obteniéndose frecuencias relativas para cada flujo. Luego, éstas se van sumando y son graficadas versus la magnitud de flujo en escala logarítmica, debido a que el rango que pueden presentar los flujos de CO₂-DDS puede ser muy amplio.

3.2.2 Metodología química de aguas

Las muestras de agua son enviadas al laboratorio del GNS, por lo que el protocolo de muestreo es básicamente el exigido por ellos. De todas maneras se resume la metodología utilizada, se utilizan 4 botellas, 3 de ellas de plástico, una de 125 ml para analizar alcalinidad, sin filtrar y sin acidificar; otra de 125 ml para analizar aniones, filtrada; otra de 60 ml para analizar cationes, filtrada y acidificada; y una de vidrio polarizado de 30 ml para analizar isótopos estables del agua, sin filtrar ni acidificar.

Como observaciones, el filtro ocupado es de papel de 45 micras y el ácido utilizado es nítrico 4 normal en 10% del volumen a acidificar. Antes de coleccionar la muestra, las botellas se ambientan 3 veces con el agua a analizar.

3.2.3 Metodología $\delta^{13}\text{C}$ -CO₂

La colección y el análisis de la muestra desde donde se midió $\delta^{13}\text{C}$ del CO₂, correspondió a gases libres desde manantiales y forma parte del estudio de isótopos de He, es decir, estas mediciones son parte de un pack de análisis al solicitar la medición de He. Por lo tanto, se describe la metodología del muestreo de este gas: primero que todo se acumula gas con un embudo sobre el manantial a muestrear, ambientado a través de la circulación de gas por su interior, este se conecta a un tubo de cobre donde la fase gaseosa es colectada, es importante que sea de cobre ya que este material no permite la fuga del gas, a diferencia de otros. El tubo se dispone bajo el agua, en el mismo manantial o en una batea para evitar la contaminación con aire y así se asegura de manera visual que exista flujo de gas. Para sellar el tubo, se emplean prensas metálicas en los extremos, capaces de impermeabilizar totalmente, aunque para estar completamente seguros de que no exista contaminación con aire, se coloca agua destilada en los bordes del tubo que quedan fuera de las prensas al finalizar el muestreo.

La muestra es enviada para su análisis al laboratorio de la Universidad de Rochester, NY, USA. El procedimiento seguido en ese lugar consiste en separar el CO₂ desde el total de la muestra usando una trampa de U mantenida a -195°C. Entonces, el CO₂ es transferido a un volumen calibrado equipado con un manómetro de capacitancia a través de una trampa a -80°C. para remover el vapor de agua. Después de la medición en el volumen calibrado, el CO₂ purificado es transferido a un "Vacu-Tainer", cuya función es ser un contenedor de vacío termo compatible para análisis isotópicos. El gas es analizado en el espectrómetro de masa Thermo Electron Corporation Finnegan Delta plus XP en un flujo continuo mediante el Thermo Electron TC/EA periférico, un Thermo Electron Conflo III, y un GC-PAL auto-medidor, de acuerdo a los procedimientos estándar Thermo para análisis y reducción de datos. La incertidumbre 2-sigma del análisis isotópico del carbono es 0.15 por mil, a menos que se indique lo contrario.

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se presentan los datos de mediciones de CO₂-DDS, resultados del tratamiento estadístico de los flujos de CO₂-DDS, geoquímica de aguas e isótopos de gases libres.

4.1 Resultados CO₂-DDS

En este capítulo se entregan los resultados de las mediciones de concentraciones y flujos de CO₂-DDS, además del tratamiento estadísticos de estos, para la obtención de un mapa de flujos de CO₂-DDS. Los resultados de las concentraciones se obtuvieron directa e instantáneamente en cada medición, mientras que los resultados del flujo debieron ser calculados como se explicó en 3.2.1.1. Por último, se señala que en el área de Juncalito, las mediciones de CO₂-DDS, tuvieron en promedio un intervalo de 3 minutos (180 s) por lo que los datos de concentraciones máximas son comparables en todas las mediciones de las distintas campañas, mientras que en Colpitas este tiempo fue variable, dados los altos flujos detectados.

4.1.1 Juncalito

El total de los resultados de concentraciones máximas y flujos de CO₂-DDS de la 1° y 2° campaña (sin incluir grilla nivel base) se muestran en las figuras 4.1 y 4.2. El resumen estadístico de estos se presenta en la tabla 4.1. El detalle de estos se entrega a continuación. Es importante notar que muchas de las mediciones de CO₂-DDS no obtuvieron cálculo de flujo positivo, debido a que no se pudo encontrar un gradiente definido, es por ello, que para mostrar los resultados, se ilustran tanto concentraciones máximas como flujos.

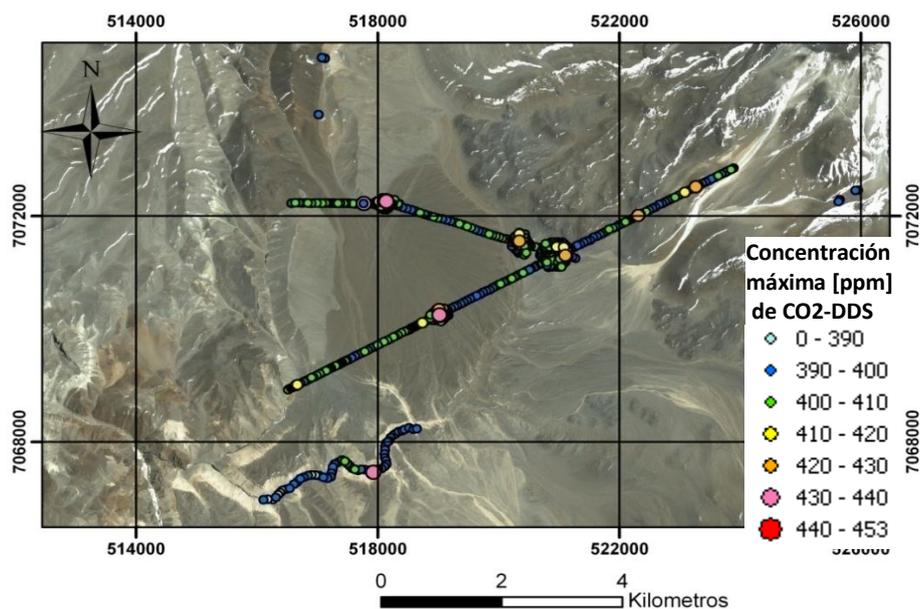


Figura 4.1. Distribución y magnitud de las concentraciones máximas de CO₂-DDS medidas en Juncalito.

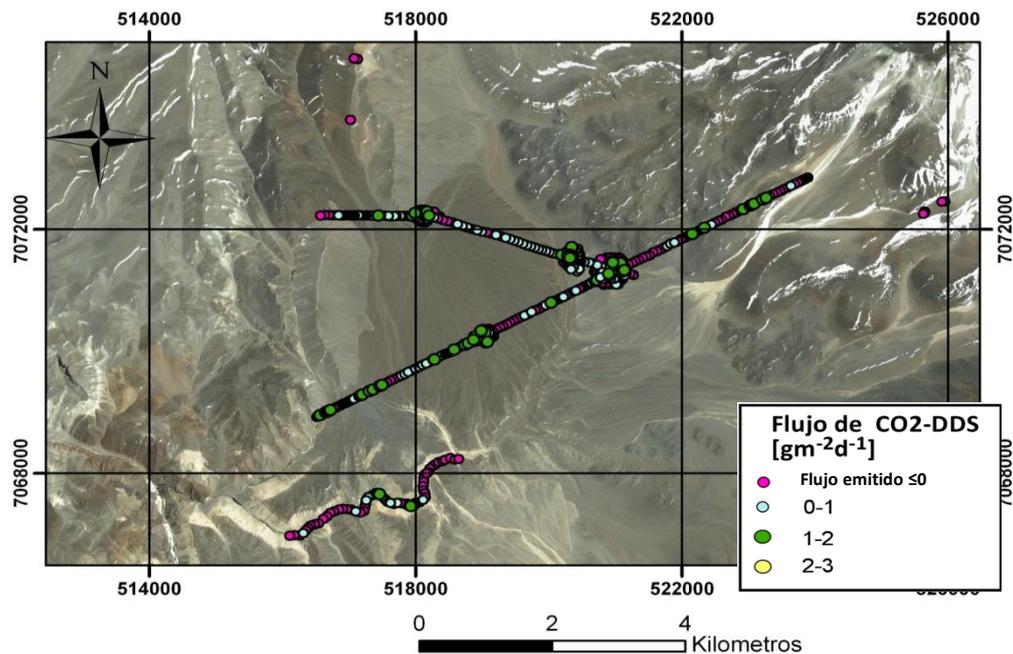


Figura 4.2. Distribución y magnitud de flujos de CO₂-DDS medidos en Juncalito.

Tabla 4.1. Estadística de las mediciones de CO₂-DDS Juncalito.

Resumen resultados Juncalito	
Nº mediciones/Nº eflujos positivos	704/394
Concentración máxima CO ₂ -DDS [ppm]	455
Promedio concentraciones máx. [ppm]	408
Desviación estándar concentraciones máx.	10
Flujo máximo CO ₂ -DDS [gm ⁻² d ⁻¹]	2,57
Flujo promedio CO ₂ -DDS [gm ⁻² d ⁻¹]	0,88
Desviación estándar flujo CO ₂ -DDS	0,36

4.1.1.1 Primera campaña:

En esta campaña se midieron 377 puntos, de los cuales sólo 203 tuvieron flujo positivo. Los resultados de los perfiles de medición de concentraciones máximas y flujos de CO₂-DDS se muestran en las figuras 4.3 y 4.4 respectivamente. El resumen estadístico de estos, se presenta en la tabla 4.2. Los puntos de medición con concentraciones más altas registrados en los perfiles de la primera campaña se ubicaron principalmente en el Llano Los Cuyanos, y se destacan mediante elipses (fig. 4.3). El punto de mayor concentración y flujo se ubica en la elipse n° 1.

La dificultad más importante radicó en que al repetir las mediciones sobre los puntos de mayores concentraciones, éstas no presentaron iguales valores. Este hecho coincidió con un cambio en las condiciones ambientales (evento pequeño de agua-nieve). Un ejemplo claro de esto ocurrió con un punto registrado en el río Negro (RN) (fig. 4.3), ya que al repetir la medición sobre éste, el valor alto no se volvió a registrar. Es por esto que desde la segunda campaña, se decidió efectuar las mediciones de variables ambientales, como se mencionó antes. Aunque los valores de CO₂-DDS medidos fueron levemente

mayores que la concentración del CO₂ atmosférico (aproximadamente 390 ppm), se decidió realizar grillas de muestreo en torno a los puntos con valores más altos. La finalidad fue alcanzar una mejor caracterización del CO₂-DDS localmente. Estas grillas fueron diseñadas tal que los puntos de mayores concentraciones (puntos de interés) se ubicaran cercanas al centro de elipses. De esta forma se intenta captar posibles geometrías de desgasificación y la atenuación de la señal de CO₂-DDS.

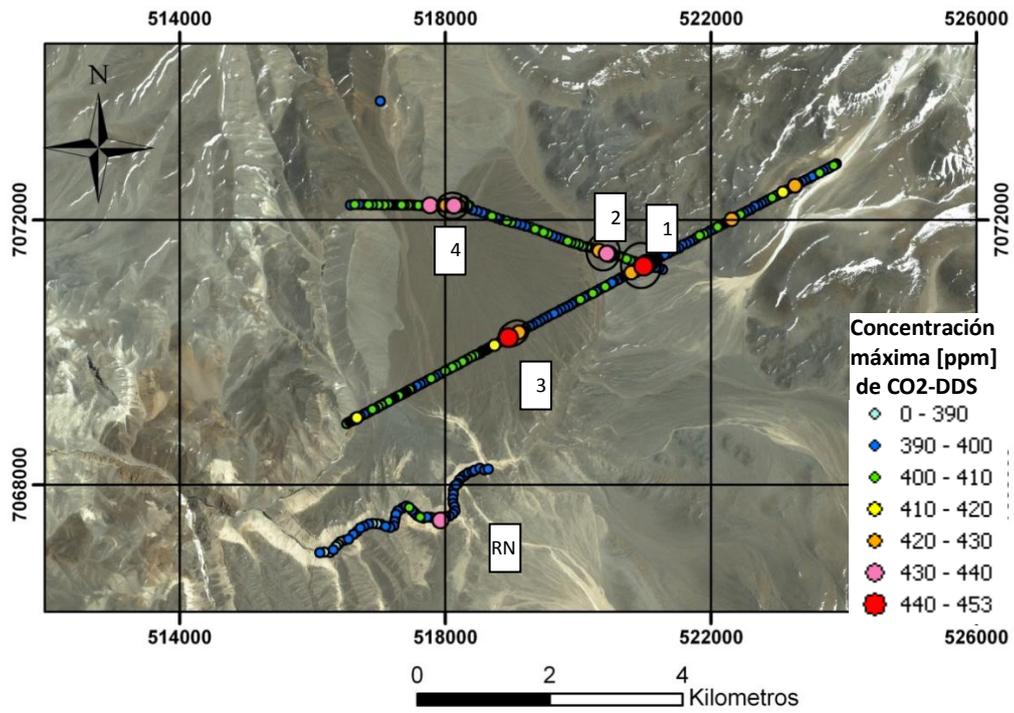


Figura 4.3. Distribución y magnitud de las concentraciones máximas de CO₂-DDS medidas en los perfiles de la primera campaña. En elipses/círculos se muestra sectores a abarcar con mediciones tipo grilla en la segunda campaña.

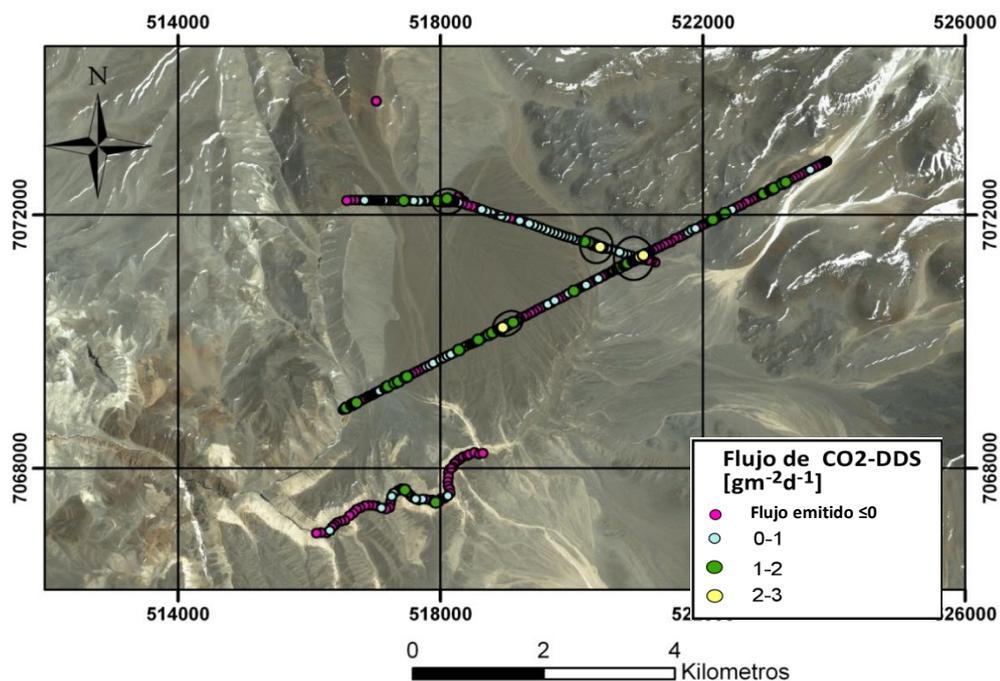


Figura 4.4. Distribución y magnitud de los flujos de CO₂-DDS medidos en los perfiles de la primera campaña. En elipses/círculos se muestra sectores a abarcar con mediciones tipo grilla en la segunda campaña.

Tabla 4.2. Estadística simple de las mediciones de CO₂-DDS primera campaña Juncalito.

Resumen resultados primera campaña Juncalito	
Nº perfiles	4
Nº mediciones/Nº eflujos positivos	377/203
Concentración máxima CO ₂ -DDS [ppm]	455
Promedio concentraciones máx. [ppm]	410
Desviación estándar concentraciones máx.	12
Flujo máximo CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	2,57
Flujo promedio CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	0,92
Desviación estándar flujo CO ₂ -DDS	0,41

4.1.1.2 Segunda campaña:

En esta campaña se midieron 272 puntos, de los cuales solo 131 tuvieron flujo positivo. Los resultados de las grillas de medición de concentraciones máximas y flujos de CO₂-DDS se muestran en las figuras 4.5 y 4.6 respectivamente. El resumen estadístico de estos, se presenta en la tabla 4.3.

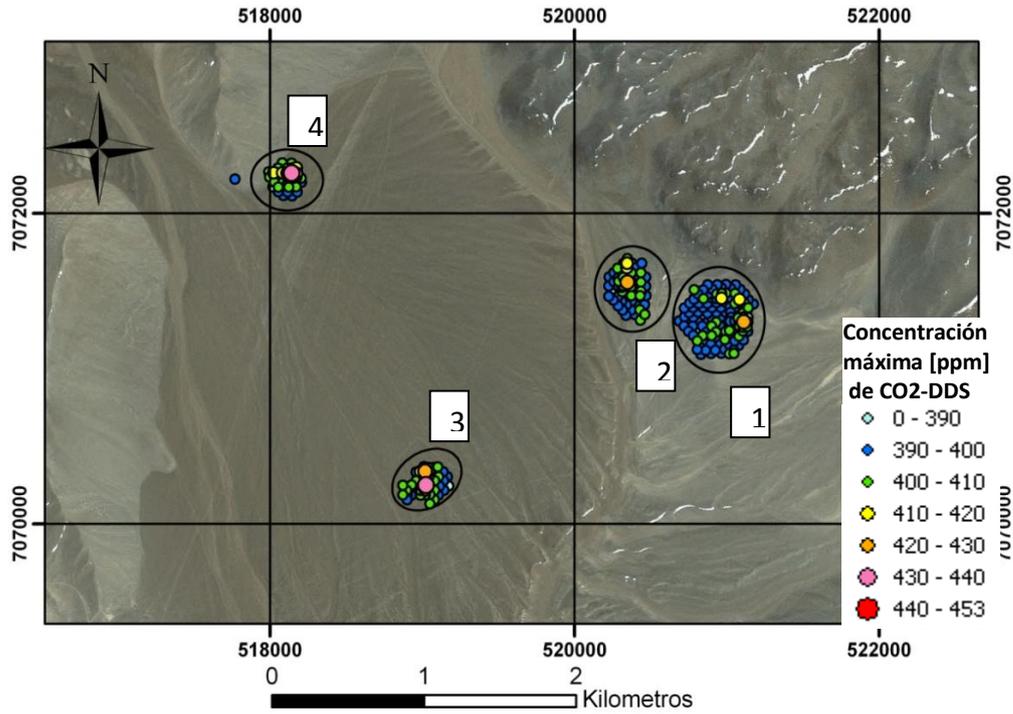


Figura 4.5. Distribución y magnitud de las concentraciones máximas de $\text{CO}_2\text{-DDS}$ medidos en las grillas de la segunda campaña. En elipses/círculos se muestra sectores abarcados con las grillas en la segunda campaña.

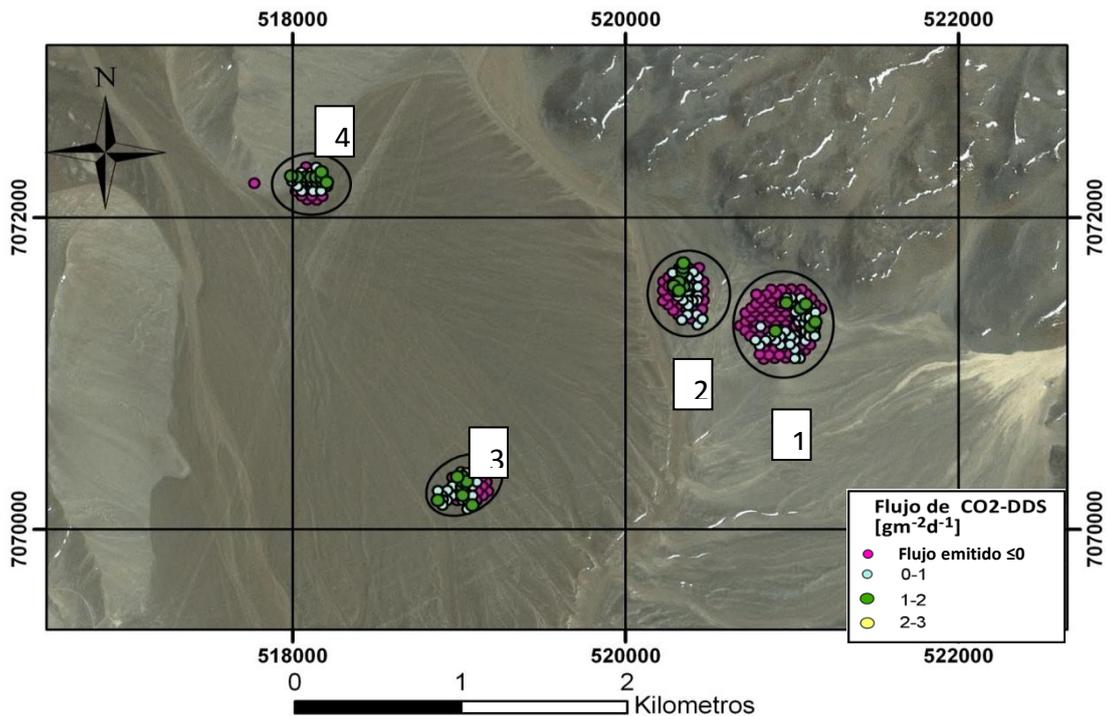


Figura 4.6. Distribución y magnitud de los flujos de $\text{CO}_2\text{-DDS}$ medidas en grillas de la segunda campaña. En elipses/círculos se muestra sectores abarcados con las grillas en la segunda campaña.

Tabla 4.3. Estadística simple de las mediciones de $\text{CO}_2\text{-DDS}$ segunda campaña Juncalito.

Resumen resultados segunda campaña Juncalito	
Nº grillas	4
Nº mediciones/Nº eflujos positivos	272/131
Concentración máxima CO ₂ -DDS [ppm]	435
Promedio concentraciones máx. [ppm]	406
Desviación estándar concentraciones máx.	6
Flujo máximo CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	1,95
Flujo promedio CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	0,84
Desviación estándar flujo CO ₂ -DDS	0,30

El detalle de mediciones en las grillas se muestra en las figuras 4.7, 4.8, 4.9. Se observa que las anomalías medidas en la primera campaña no se mantuvieron en magnitud, pues el punto de mayor concentración encontrado llegó a 435 ppm, con un flujo de menor a 2. Este fue registrado en la grilla 3. Desde los resultados obtenidos, no es posible interpretar ninguna geometría o patrón de desgasificación visible en el terreno. Solo hay unos pocos datos de mayor flujo orientados, pero muy localmente, incluso se identifica la atenuación o disminución de la señal de CO₂-DDS dentro de la misma grilla. Esto se observa en las grillas 3 y 4 (fig 4.8, 4.9), donde las direcciones preferenciales de los flujos mayores serían NS y EW respectivamente, mientras que en la grilla 1 y 2 se reconoce que estos valores se presentan de manera puntual.

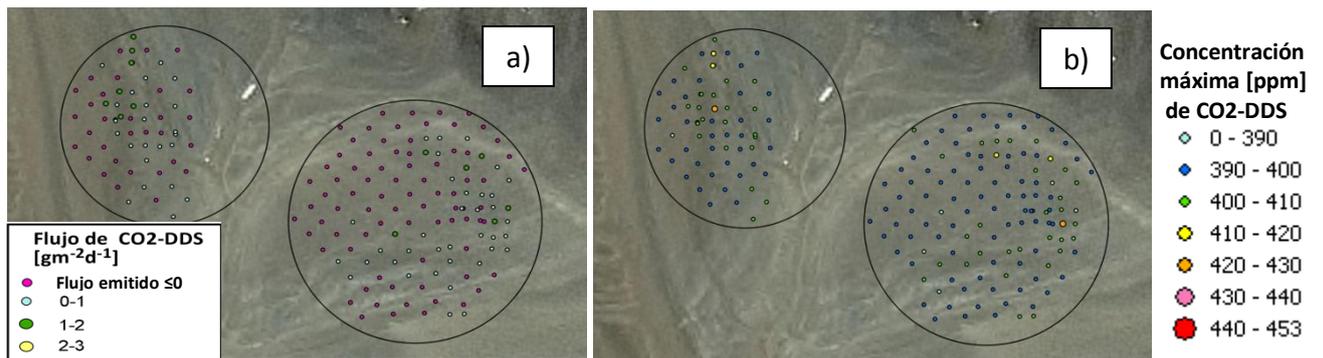


Figura 4.7. Distribución y magnitud de las mediciones de flujos (a) y concentraciones máximas (b) de CO₂-DDS efectuadas en las grillas 1 y 2 de la segunda campaña.

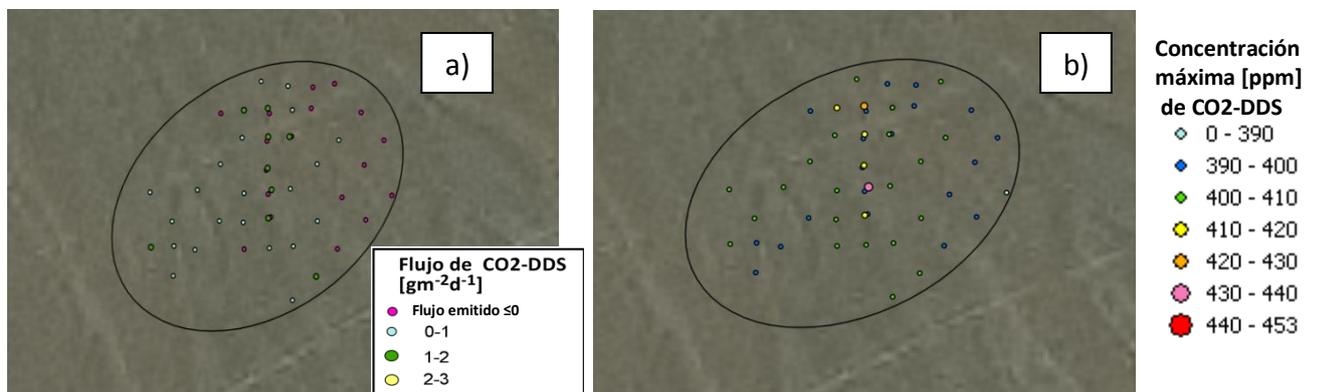


Figura 4.8. Distribución y magnitud de las mediciones de flujos (a) y concentraciones máximas (b) de CO₂-DDS efectuadas en la grilla 3 de la segunda campaña.

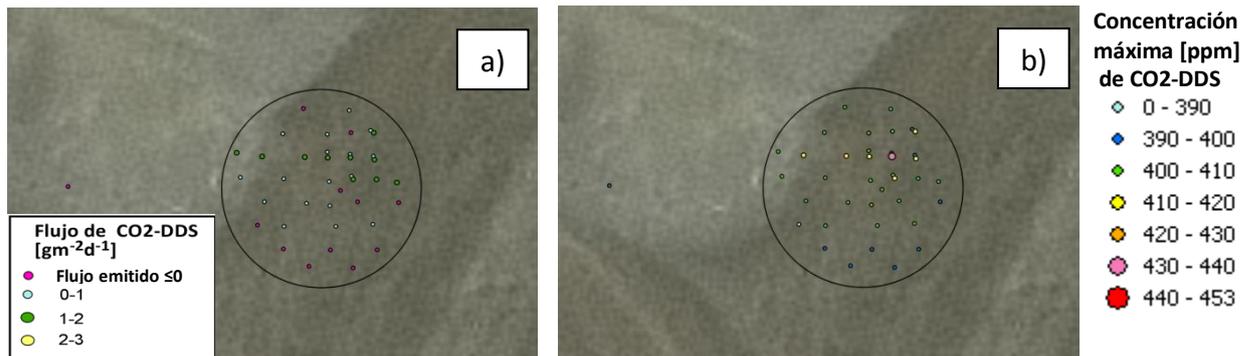


Figura 4.9. Distribución y magnitud de las mediciones de flujos (a) y concentraciones máximas (b) de $\text{CO}_2\text{-DDS}$ efectuadas en la grilla 4 de la segunda campaña.

4.1.1.3 Tercera campaña

4.1.1.3.1 Estudio de variaciones diurnas

En estudios anteriores se han registrado variaciones diurnas de concentraciones de $\text{CO}_2\text{-DDS}$ (Granieri et al., 2003), y según los datos obtenidos en la primera y segunda campaña en Juncalito se sospechaba tal fenómeno. Con la intención de comprobar esta hipótesis, en la tercera campaña se registró la variación de los flujos de $\text{CO}_2\text{-DDS}$ a lo largo de un día en un solo punto. Esta prueba se efectuó en tres puntos, uno en cada grilla, sobre los sitios de valores máximos medidos en las campañas anteriores, excepto en la 2, como se explicó en 3.1.1 (fig 4.10). En este pequeño estudio se midió: 21 veces en G1, 17 veces en G3, 17 veces en G4; de los cuales solo tuvieron flujo calculable 11, 10 y 9 respectivamente. Los resultados de la variación diurna de los flujos medidos de $\text{CO}_2\text{-DDS}$ se muestran en la figura 4.11. En ésta se reconoce que en el punto G1 hay un aumento y posterior descenso más marcado del flujo. Mientras que en los otros dos puntos este patrón es más leve. Porcentualmente, las diferencias entre el valor máximo y el mínimo en G1, G3 y G4, son 72, 46 y 40% respectivamente. En todos los casos destacan las oscilaciones o comportamientos aserrados de las variaciones de flujo. Por último, se muestra los datos de mayor flujo se encuentran entre las 11 y las 16 horas. En la tabla 4.4 se muestra el resumen estadístico de los registros.

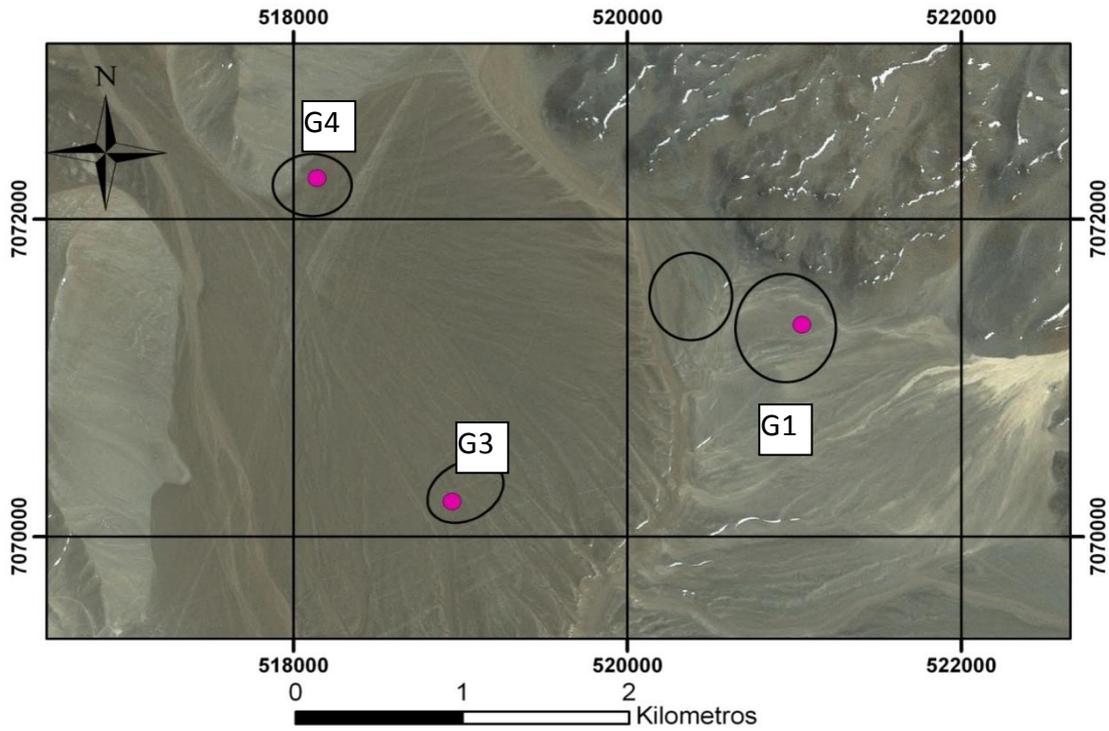


Figura 4.10. Puntos de medición de variación diurna. Tercera campaña.

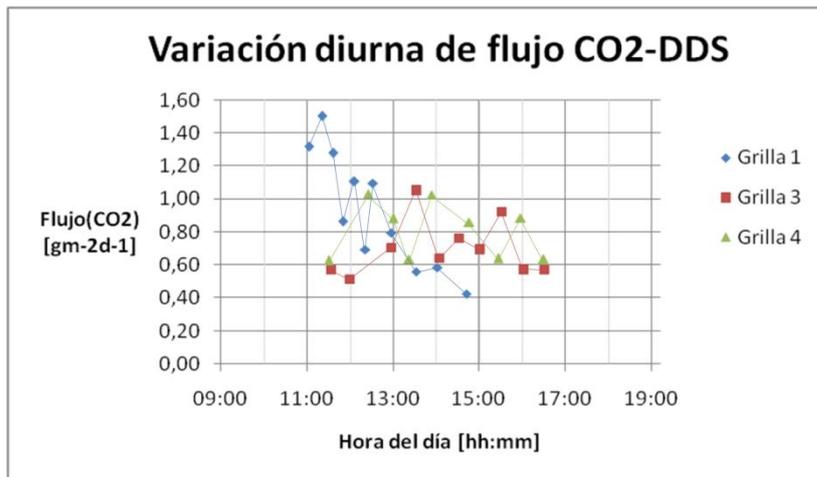


Figura 4.11. Variación diurna de flujo de CO₂-DDS durante un día de medición en 3 puntos, representados como grilla 1, 3 y 4. Tercera campaña.

Tabla 4.4. Estadística de las mediciones de variación diurna de CO₂-DDS tercera campaña Juncalito.

Resumen resultados G1 Juncalito	
Nº mediciones/Nº eflujos positivos	21/11
Concentración máxima CO ₂ -DDS [ppm]	424
Promedio concentraciones máx. [ppm]	405
Desviación estándar concentraciones máx.	8
Flujo máximo CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	1,50
Flujo promedio CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	0,9
Desviación estándar flujo CO ₂ -DDS	0,4

Resumen resultados G3 Juncalito	
Nº mediciones/Nº eflujos positivos	17/10
Concentración máxima CO ₂ -DDS [ppm]	407
Promedio concentraciones máx. [ppm]	401
Desviación estándar concentraciones máx.	2
Flujo máximo CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	1,05
Flujo promedio CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	0,7
Desviación estándar flujo CO ₂ -DDS	0,2

Resumen resultados G4 Juncalito	
Nº mediciones/Nº eflujos positivos	17/9
Concentración máxima CO ₂ -DDS [ppm]	408
Promedio concentraciones máx. [ppm]	402
Desviación estándar concentraciones máx.	3
Flujo máximo CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	1,03
Flujo promedio CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	0,8
Desviación estándar flujo CO ₂ -DDS	0,2

Para identificar posibles correlaciones entre las variaciones de flujos de CO₂-DDS y las variaciones en los parámetros ambientales se eligieron dos tratamientos. El primero fue una correlación lineal, considerando al flujo de CO₂-DDS como variable dependiente, y como variable independiente a los parámetros ambientales. De esta forma, la regresión lineal entre las variables intenta cuantificar porcentualmente la influencia ambiental sobre el flujo, a través del coeficiente R² (fig. 4.12). Sin embargo, no se logra normalizar la influencia a un 100% pues no se consideran todas las variables en conjunto, sino que por separado. El segundo, constituye un modelo inverso lineal que tiene por objeto integrar todas las variaciones en los parámetros ambientales para determinar si existe un control sobre las variaciones de los flujos de CO₂-DDS. Este cálculo fue efectuado en MATLAB, con un algoritmo de inversión simple. La finalidad de este modelo es intentar identificar qué variable ambiental afectaría más al flujo (por estar normalizada).

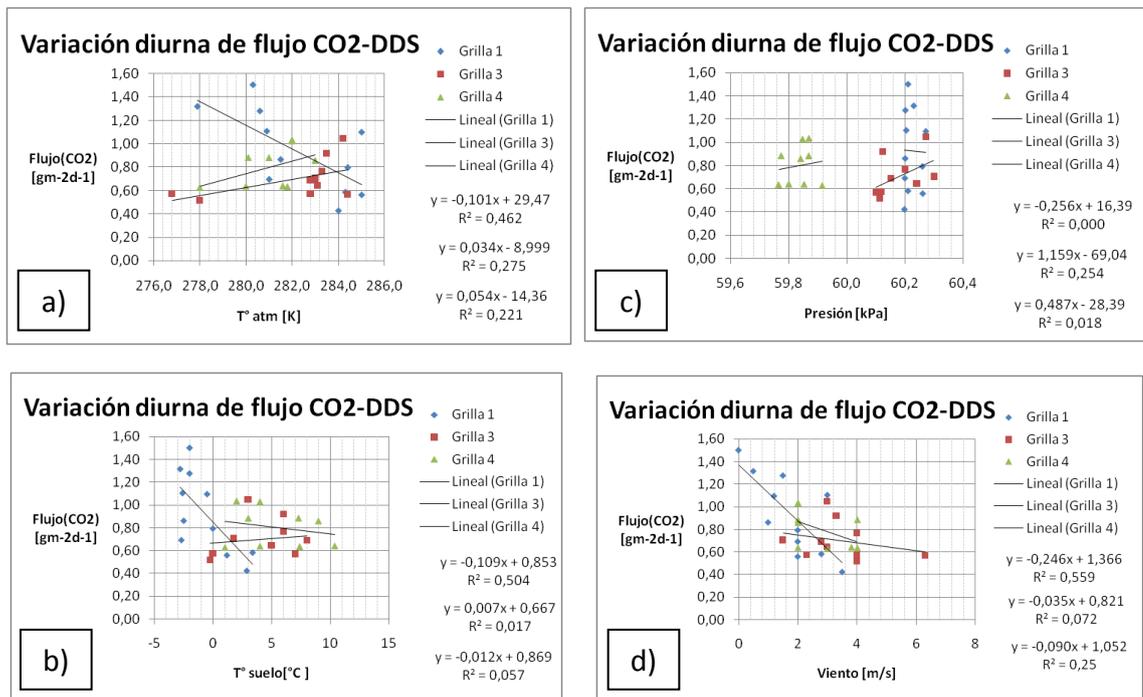


Figura 4.12. Correlación entre la variación de parámetros ambientales y la variación diaria de flujo de CO2-DDS durante un día de medición para los 3 puntos, representados como grilla 1, 3 y 4. Tercera campaña. a) Temperatura del aire versus Flujo CO2-DDS. b) Temperatura del suelo versus Flujo CO2-DDS. c) Presión versus Flujo CO2-DDS. d) Velocidad del viento versus Flujo CO2-DDS.

medición (G1,G3 y G4) no existe un patrón importante que relacione la variación del flujo de CO2-DDS con el cambio de las condiciones ambientales. Se da que la magnitud de la influencia (R^2) de estas condiciones es baja para los 3 puntos, o es importante solo para uno y casi despreciable para los otros 2, excepto para la variable de temperatura atmosférica, que tiene sobre un 25% de influencia, pero tiene relación opuesta entre el punto G1 y los otros 2, es decir, en el primero disminuye el flujo al aumentar la temperatura del aire. Sin embargo, en los otros 2 puntos, al aumentar la temperatura, el flujo aumenta.

Los resultados del segundo procedimiento no ajustan bien en la mayoría de los datos (fig. 4.13). Se reconoce que presentan un gran error asociado al ajustar el flujo simulado al real (fig. 4.13b).

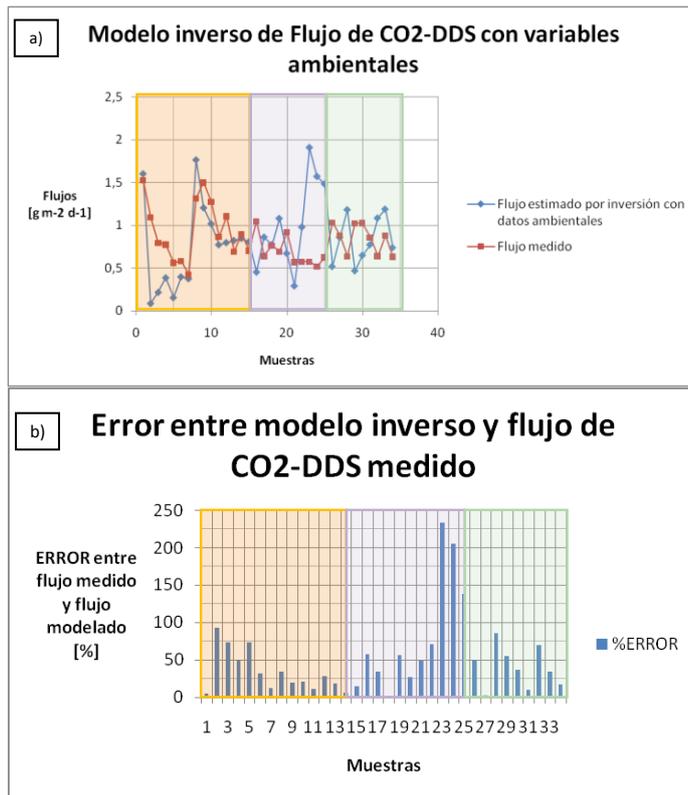


Figura 4.13. a) Modelo inverso de flujo de CO₂-DDS relacionado con parámetros ambientales, muestra flujos reales y estimados por el modelo en cada punto representado por G1, G3 y G4. b) Error porcentual entre el flujo real y el estimado en cada punto.

4.1.1.3.2 Grilla de nivel base

Se midieron 59 puntos, de los cuales, sólo 20 tuvieron flujo calculable. Los resultados de las grillas de medición de concentraciones máximas y flujo de CO₂-DDS se ilustran en la figura 4.14. En la tabla 4.5 se muestra el resumen estadístico de los registros. Se observa que no existe gran diferencia entre estos datos y los de las grillas del Llano Los Cuyanos, del orden de 1-2 [g m⁻² d⁻¹]. También se reconoce que sólo las concentraciones superiores a 400 ppm tienen flujos calculables. En particular, estos se registraron alineados en sentido EW (fig 4.14).

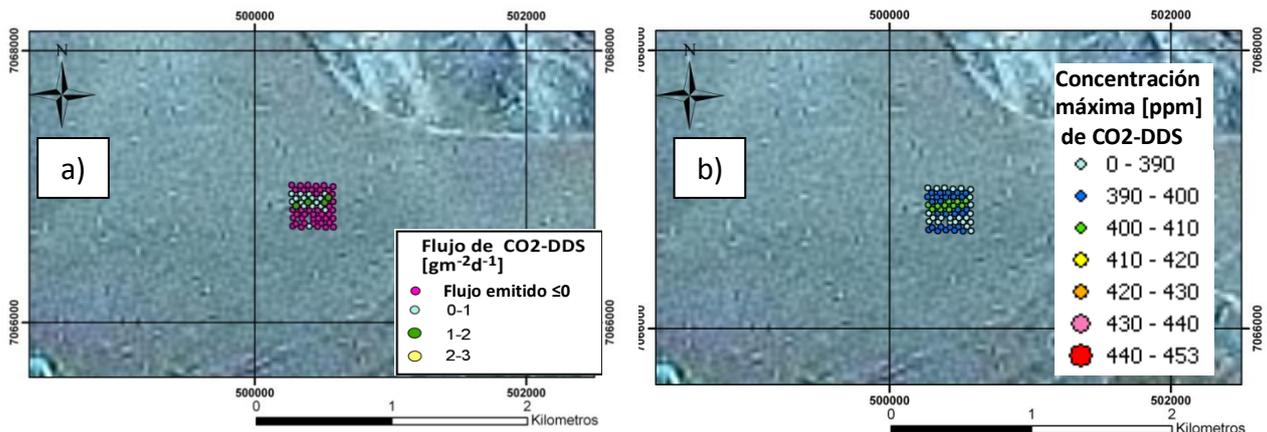


Figura 4.14. Distribución y magnitud de las mediciones de flujos (a) y concentraciones máximas (b) de CO₂-DDS efectuadas en la grilla de nivel base de la tercera campaña.

Tabla 4.5. Estadística de las mediciones de CO₂-DDS grilla Pampa La Ola, tercera campaña Juncalito.

Resumen resultados grilla nivel base Juncalito	
Nº grillas	1
Nº mediciones/Nº eflujos positivos	59/20
Concentración máxima CO ₂ -DDS [ppm]	408
Promedio concentraciones máx. [ppm]	401
Desviación estándar concentraciones máx.	3
Flujo máximo CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	1,19
Flujo promedio CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	0,82
Desviación estándar flujo CO ₂ -DDS	0,23

A modo de resumen, se reconoce que las principales características del flujo de CO₂-DDS de este sector son pocos puntos con flujo positivo; flujos con valores bajos, considerando la estadística del rango descrito en estudios anteriores (Chiodini et al., 2008) y del rango de datos de Pampa La Ola; y por último, pequeñas variaciones del flujo a lo largo del día.

4.1.2 Colpitas

El total de los resultados de flujos de CO₂-DDS de la 1° y 2° campaña (sin incluir grilla de nivel base) se muestran en la figura 4.15. El resumen estadístico de estos se presenta en la tabla 4.6. El detalle de estos se entrega a continuación. El protocolo de medición en Colpitas fue algo diferente al de Juncalito, debido a que las concentraciones máximas registradas fueron muy altas, lo cual obligó a reducir el tiempo de medición de CO₂-DDS en algunos casos a un minuto. Como las concentraciones máximas dependen, en parte del tiempo de medición, entonces estos datos no son comparables entre ellos si tienen distintos tiempos de acumulación. Por lo tanto, sólo se mostrarán datos de flujo. Además, la cantidad de mediciones con flujo menor o igual a 0 es baja.

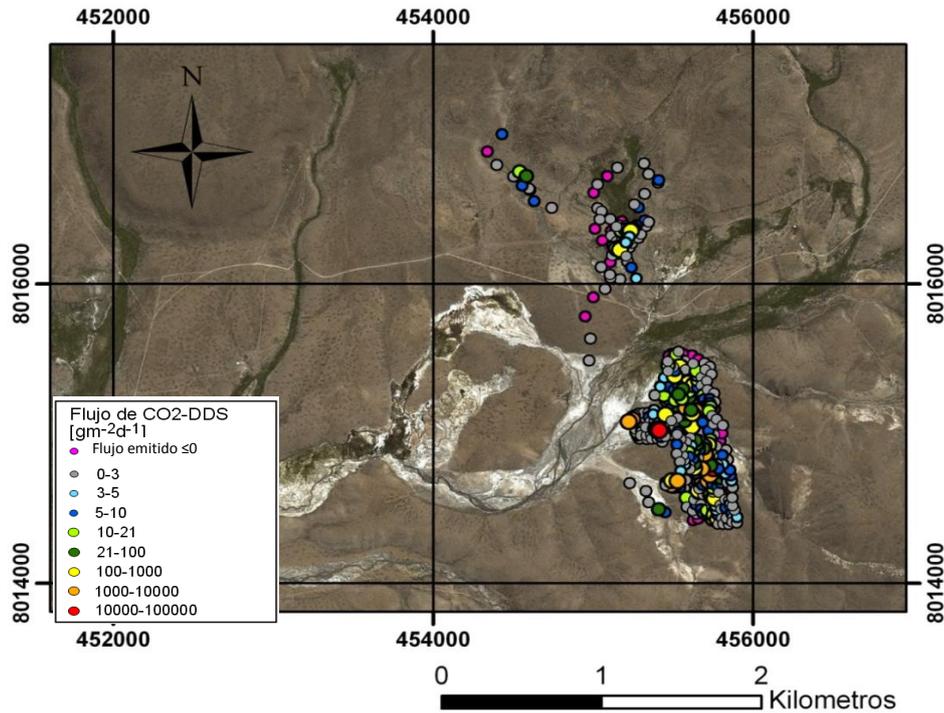


Figura 4.15. Distribución y magnitud de los flujos de CO₂-DDS medidos en Colpitas.

Tabla 4.6. Estadística de las mediciones de CO₂-DDS en Bofedal Colpitas.

Resumen resultados Colpitas	
Nº mediciones/Nº eflujos positivos	538/468
Flujo máximo CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	26903
Flujo promedio CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	416
Desviación estándar flujo CO ₂ -DDS	1943

4.1.2.1 Primera campaña:

En esta campaña se midieron 274 puntos, de los cuales 224 tuvieron flujo positivo. Los resultados de los perfiles y grillas de medición de flujos de CO₂-DDS del bofedal N y S se muestran en las figuras 4.16 y 4.17 respectivamente. El resumen estadístico de estos se presenta en la tabla 4.7. Los puntos de medición más altos registrados en los perfiles de la primera campaña se ubicaron principalmente en el Bofedal Sur, con al menos 4 sectores con puntos de interés, señalados en fig. 4.17. Es por ello que se diferenciará el Bofedal S en 4 sectores: BS1, BS2, BS3 y BS4, representando al norte, centro, sur y sector de termas del bofedal S (sector centro occidental del bofedal S) respectivamente. El BS3 muestra los mayores flujos medidos sobre morfologías circulares irregulares en el suelo. Están caracterizados por tener una zonación de tipo aureola, que desde afuera hacia adentro presenta 3 tipos de capas. La externa es de óxidos pardo-rojizos (posiblemente óxidos de Fe); la segunda está conformada por precipitados salinos blanquecinos; y la central, por sales amarillas (fig 4.18). El diámetro de estas estructuras varía entre 25 cm y 1 m. Estos se encontraban alineados a lo largo de unos 50 m aproximadamente en dirección NS (fig 4.19). En BS2, en una zona de quebrada, se registraron altos valores sobre afloramientos de parches de ignimbrita alterada fuertemente a arcillas (fig 4.20). En BS1, los altos valores de flujo fueron registrados sobre calicatas, que van desde 0,5 hasta 2 m de profundidad. En ellas, se observan ignimbritas

fuertemente alteradas a arcillas (fig 4.21). Están distribuidas principalmente desde el sector centro hasta el sector norte del BS. Algunas de éstas destacan por la presencia de un intenso olor a ácido sulfhídrico. Por último, en el sector BS4 los puntos de interés se encuentran en las cercanías de los manantiales termales (fig 4.22).

En el Bofedal N también se encontraron valores de flujo altos, destacando al menos 2 sectores. El primero de ellos, se registró en una zona de un parche de suelo alterado sin vegetación (rodeado de ella) cercano al bofedal (fig 4.23). La segunda zona de valores altos, se encontró cerca de los manantiales termales en superficie en donde se registró burbujeo intenso (fig. 4.24).

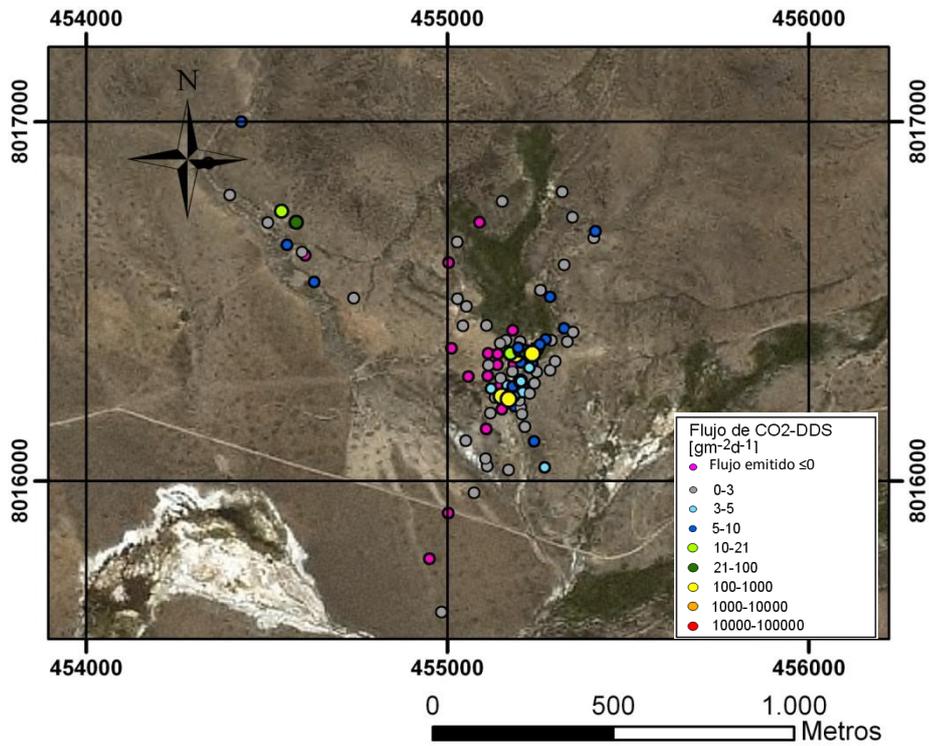


Figura 4.16. Muestra la distribución y la magnitud de los flujos de CO₂-DDS medidos en el Bofedal N.

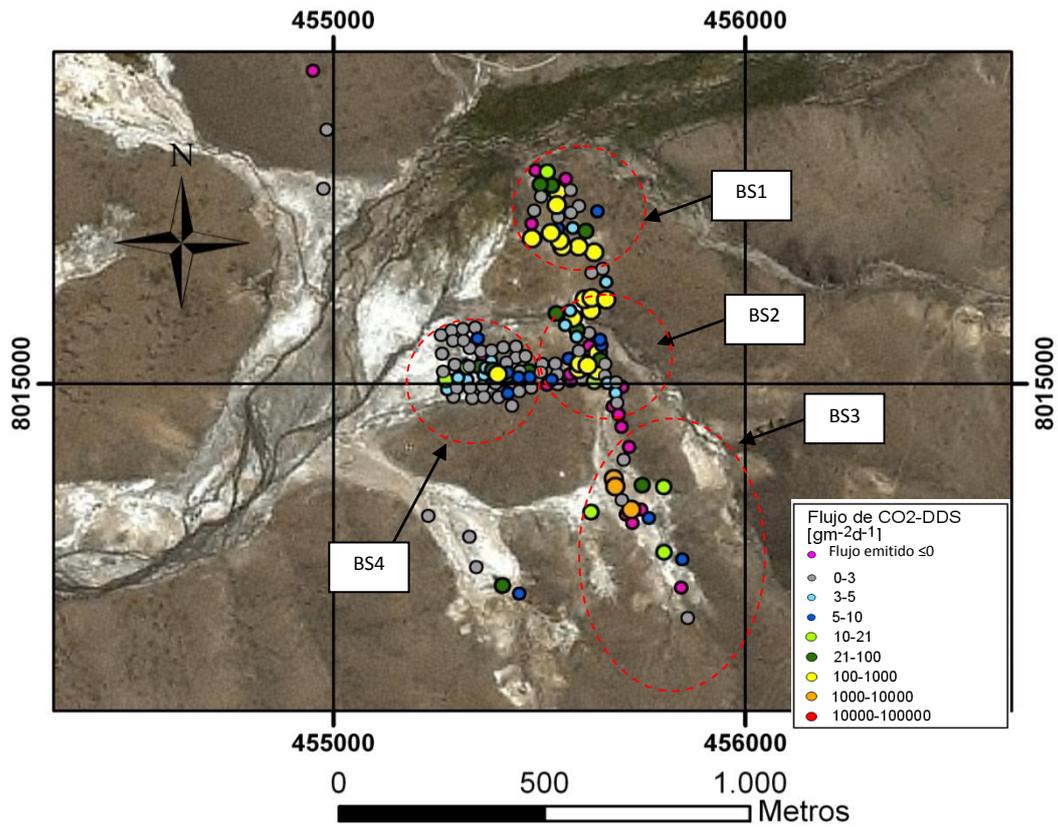


Figura 4.17. Muestra la distribución y la magnitud de los flujos de CO₂-DDS medidos en el Bofedal S.

Tabla 4.7. Estadística simple de las mediciones de CO₂-DDS primera campaña Colpitas.

Resumen resultados primera campaña Colpitas	
Nº mediciones/Nº eflujos positivos	265/218
Flujo máximo CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	7486
Flujo promedio CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	107
Desviación estándar flujo CO ₂ -DDS	560



Figura 4.18. Morfología de estructuras circulares irregulares en el suelo



Figura 4.19. Estructuras circulares alineadas aproximadamente NS, destacadas con las elipses rojas.



Figura 4.20. Parches de ignimbrita alterada fuertemente a arcillas muy porosas.



Figura 4.21. Calicata en el BS1. a) vista longitudinal. b) Detalle al interior de calicata.



Figura 4.22. Ubicación de puntos cerca de manifestaciones en BS4, ver 4.17. a) Detalle en planta b) se muestra en elipse la ubicación de valores altos en primera campaña.



Figura 4.23. Zona de depósitos erodados, alterados, sin vegetación. a) Detalle en planta, ver 4.16. b) se muestra en elipse la ubicación de valores altos en primera campaña.

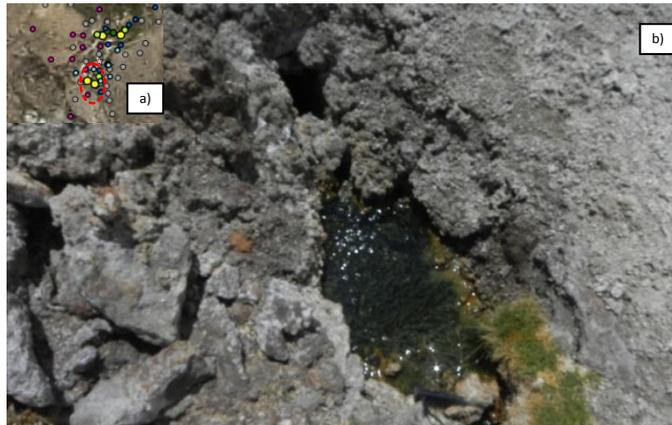


Figura 4.24. Manantial termal con burbujeo en BN. a) Detalle en planta, ver 4.16. b) expresión en terreno.

ión
NNW-SSE. En una segunda campaña, se decidió realizar una grilla de muestreo que incluyera a los sectores de interés en el Bofedal S. El objetivo fue verificar si el conjunto de los valores más altos de flujo seguían la orientación antes nombrada y alcanzar una mejor caracterización de la distribución del flujo de CO_2 -DDS localmente.

4.1.2.2 Segunda campaña:

En esta campaña se midieron 277 puntos en el Bofedal Sur, de los cuales, 242 tuvieron flujo positivo. Los resultados de la grilla de medición de flujos de CO_2 -DDS se muestran en la figura 4.25. El resumen estadístico de estos, se presenta en la tabla 4.8. A continuación se comenta donde se encuentran puntos de valores más altos.

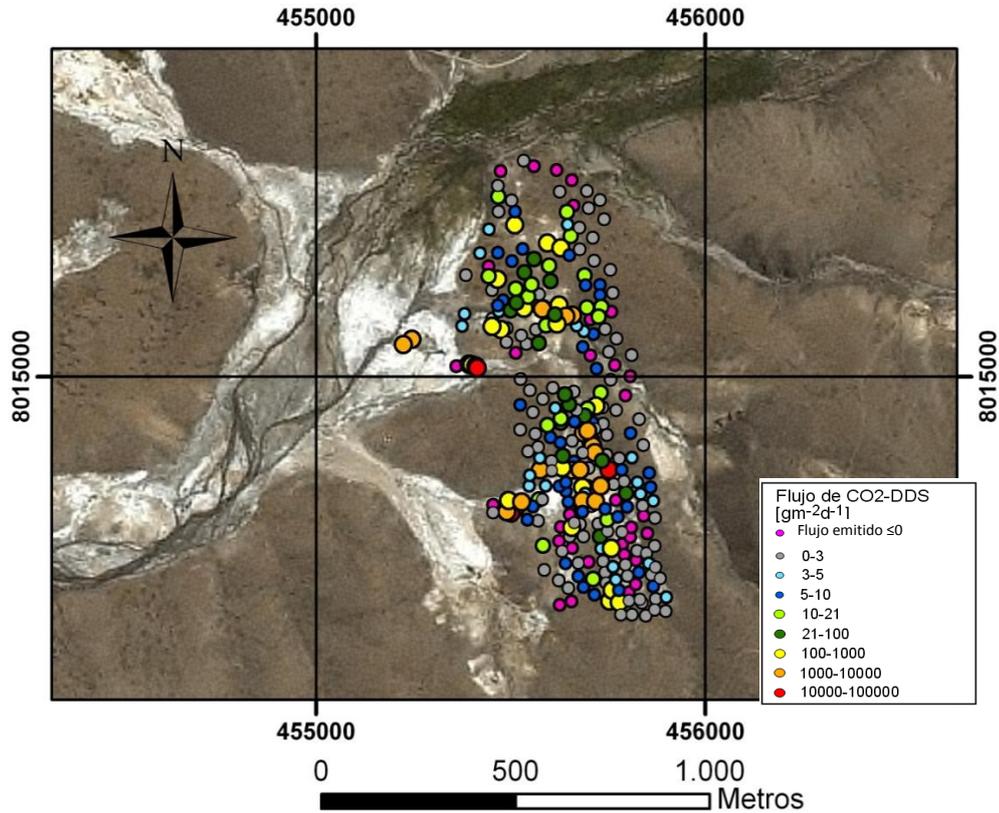


Figura 4.25. Distribución y magnitud de flujos de CO₂-DDS medidos en la segunda campaña.

Tabla 4.8. Estadística simple de las mediciones de CO₂-DDS segunda campaña Colpitas.

Resumen resultados segunda campaña Colpitas	
Nº mediciones/Nº eflujos positivos	277/242
Flujo máximo CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	26903
Flujo promedio CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	692
Desviación estándar flujo CO ₂ -DDS	2595

Al realizar la comparación entre los datos de la primera y la segunda campaña, se puede notar que ésta última tiene valores de flujo mucho mayores en promedio, pero con una gran dispersión de los datos, mostrada por la desviación estándar. Esto ocurre porque los flujos medidos en algunos puntos fueron muy altos, y lo interesante es que coincidían con algún rasgo geológico en particular, como se describe a continuación en cada sector.

En BS1, los valores más altos se presentan en pequeños parches de ignimbrita que afloran muy alterados (fig 4.25), así como también en calicatas como las descritas en 4.2.2.1.

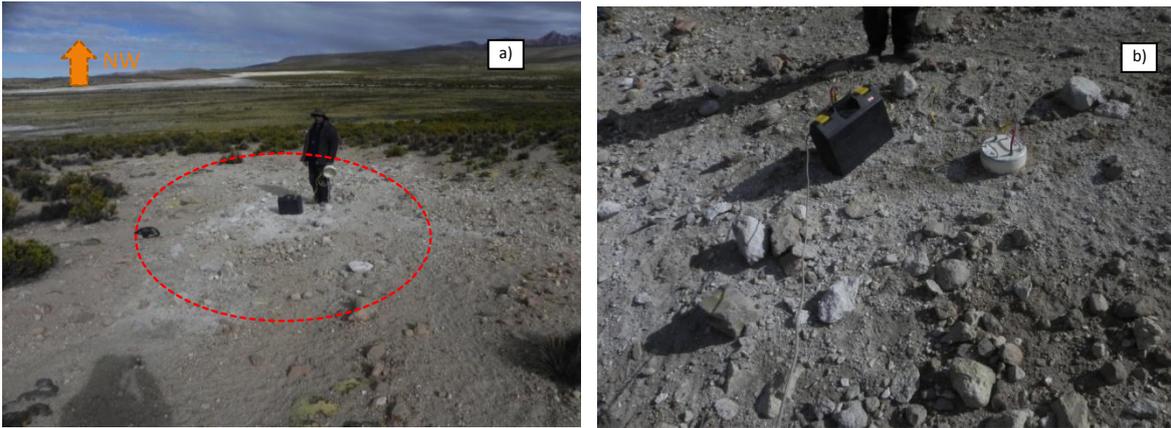


Figura 4.25. a) Pequeño parche de ignimbrita alterado demarcado por elipse roja, en BS1. b) Acercamiento a punto de medición.

En BS2 destaca el alineamiento de altos valores de flujo de CO_2 -DDS asociados tanto a sectores pequeños de alteración de precipitados minerales en el suelo, similares a los antes mencionados, como a rocas alteradas. Estos lineamientos presentan direcciones ENE-WSW y NW-SE (fig 4.26). En este sector, el tamaño y apariencia de estas estructuras varía, como se ilustra en las figuras siguientes. Se habla sólo del primer lineamiento, ya que muestra altos valores en mayor extensión superficial y también muestra atenuación de la señal de CO_2 -DDS, incluso con registros de valores anómalos sobre depósitos de gravas que sobreyacen la ignimbrita Lauca. Este lineamiento se detalla en las figuras 4.27-31.

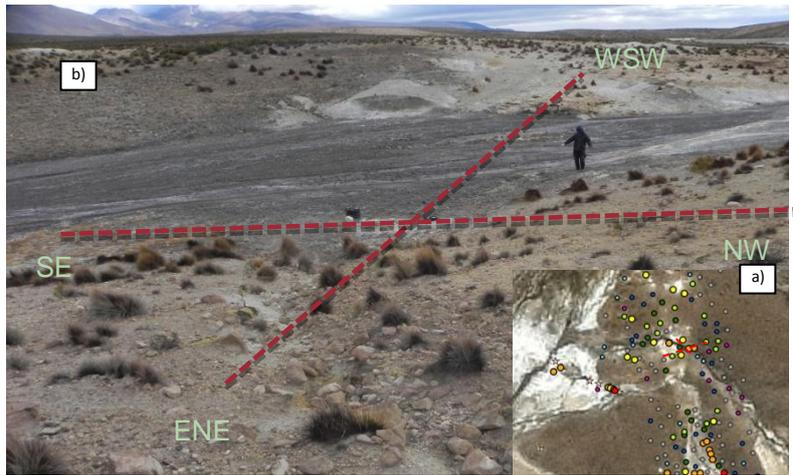


Figura 4.26. Alineamiento de altos flujos de CO₂-DDS asociados a sectores de alteración de suelo y rocas alteradas en BS2. a) Ubicación en planta, ver fig 4.17. b) Ubicación terreno

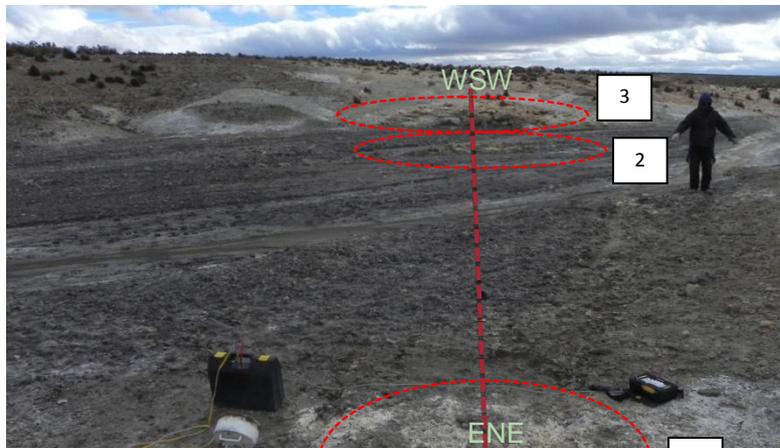


Figura 4.27. Alineamiento de altos flujos de CO₂-DDS asociado a rasgos de alteración, en orientación ENE-WSW. El detalle de 1, 2 y 3 se muestra en las siguientes figuras.



Figura 4.28. Detalle de 1) de la fig. 4.27. a) extensión completa. b) lugar de medición, en este se aprecia la marca que deja la cámara al ser enterrada en el suelo.

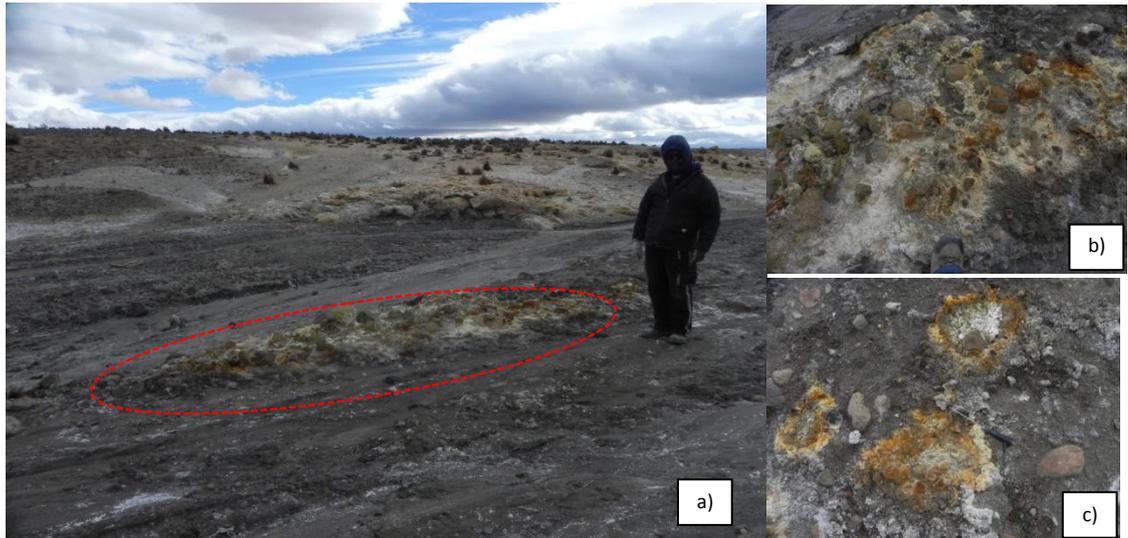


Figura 4.29. Detalle de 2) de la fig. 4.27. a) Observación cercana de una barra fluvial/palustre alterada. b) y c) un acercamiento de la barra, muestra zonaciones similares a las descritas antes, óxidos, sales blancas y amarillas.

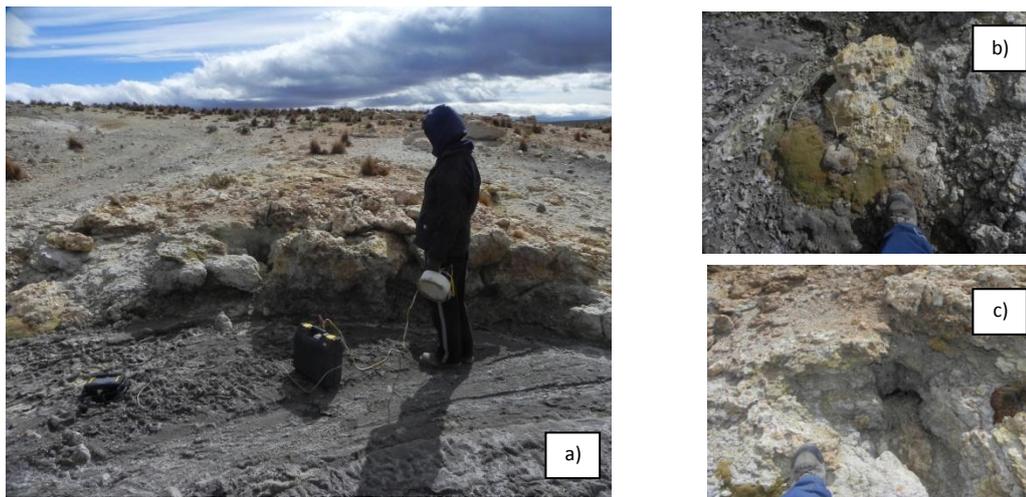


Figura 4.30. Detalle de 3) de la fig. 4.27. a) Observación de un afloramiento de ignimbrita alterada. b) y c) acercamientos del afloramiento, precipitados de minerales amarillos.

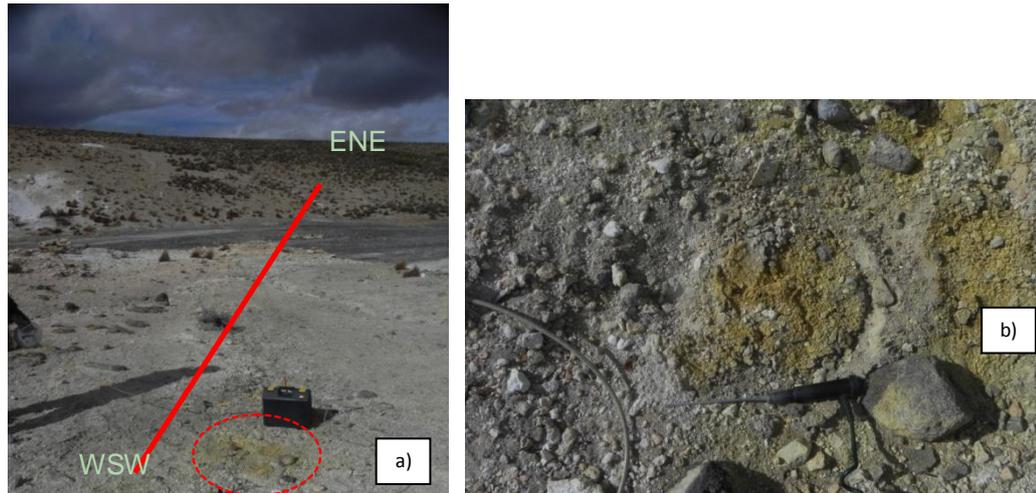


Figura 4.31. Sector ubicado unos metros al WSW del afloramiento mostrado en 4.30. a) Medición sobre ignimbrita alterada, mostrando el lineamiento en sentido contrario, WSW-ENE, elipse roja muestra punto de medición. b) Detalle de suelo alterado con minerales pardo anaranjados o amarillentos.

En BS3 también existen 2 claros lineamientos de altos valores de flujos. En este caso, se encuentran sólo asociado a las estructuras circulares zonadas de alteración, el primero en dirección NNW-SSE y el segundo es aproximadamente NS (fig 4.32). En este sector, el tamaño y apariencia de estas estructuras es bastante similar entre ellas y en algunos casos se muestran agrupadas, como se ilustra en las figuras. Estos altos valores presentan una atenuación paulatina de la señal en la misma orientación del lineamiento, pero no así al alejarse en la dirección perpendicular ENE-WSW.

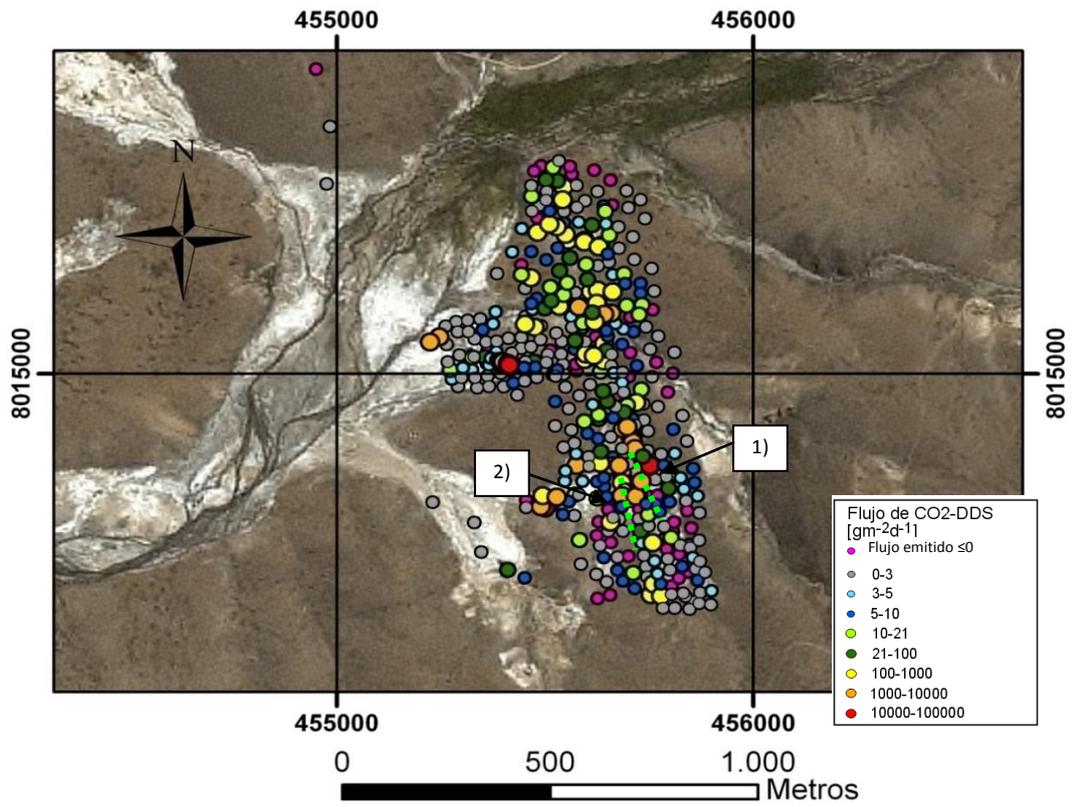


Figura 4.32. Alineamiento de valores altos de flujos de CO₂-DDS asociados a estructuras circulares, resaltados con líneas punteadas en verde. Separados en 1 y 2.



Figura 4.33. Alineamiento 1) de fig 4.32. a) Detalle del primer alineamiento. Las estructuras se observan alargadas. En elipse roja, se denota ubicación de b). b) Detalle de más estructuras, alineadas y agrupadas. En elipse se marca ubicación de c). c) Detalle de estructura circular característica.

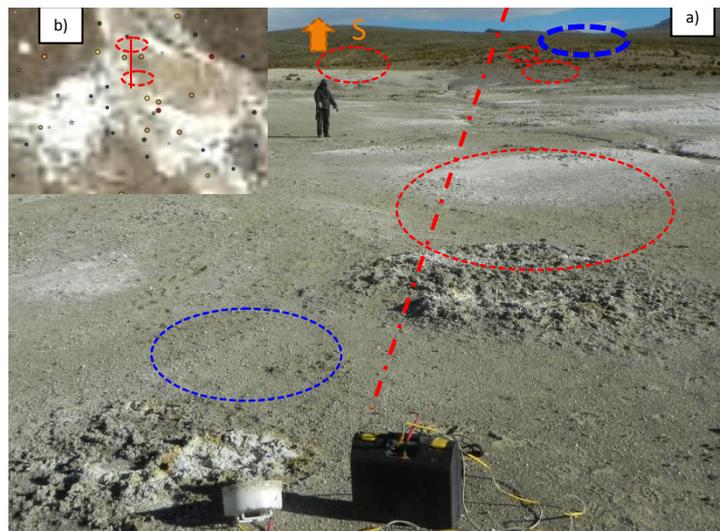


Figura 4.34. Alineamiento de figura 4.32. a) Estructuras circulares alineadas aproximadamente NS, destacadas con las elipses rojas, las azules muestran puntos de medición de flujos. (b) Ubicación de estos puntos en planta, ver fig. 4.32.

En BS3, en el sector sur del segundo lineamiento nombrado se registra un máximo de flujo de CO₂-DDS. En ese punto (fig 4.35) se colectó una muestra para ser analizada por DRX (COLR-138A sales amarillas y COLR-138B sales blancas). Los resultados de los minerales encontrados en esas muestras se expresan en tabla 4.9.

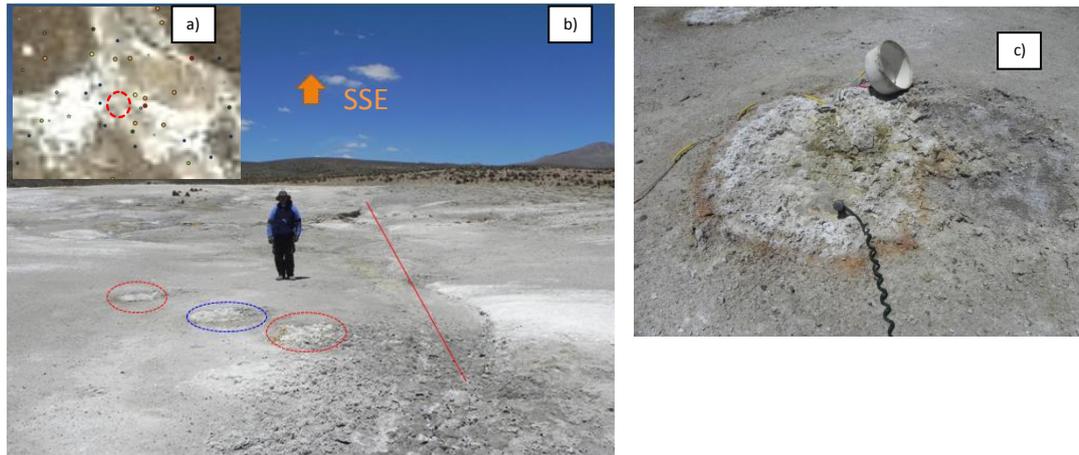


Figura 4.35. a) Ubicación en planta uno de los puntos de máximo flujo de CO_2 -DDS, ver fig. 4.32. b) Ubicación y apariencia en terreno, en elipse azul se muestra punto exacto de medición y colección de muestra de precipitados para DRX. c) Detalle del punto.

En el sector occidental de BS3 se reconoce otro sector de valores altos de flujo de CO_2 -DDS. Este no presenta estructuras circulares, sino que más bien se observan rasgos de alteración superficial del suelo en una pequeña quebrada NNW-SSE.

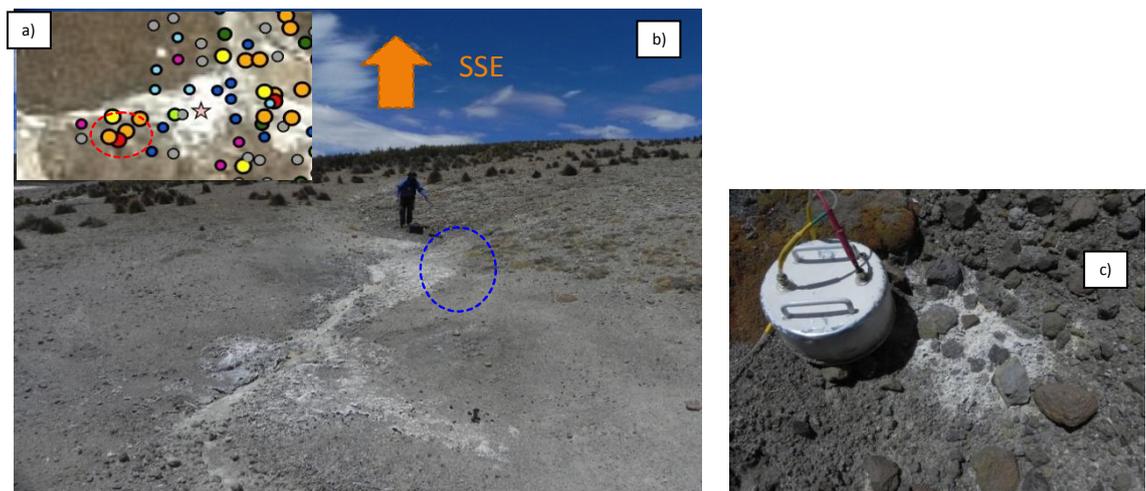


Figura 4.36. a) Ubicación en planta uno de los puntos de máximo flujo de CO_2 -DDS en sector occidental de BS3, ver fig. 4.32. b) Ubicación y apariencia en terreno, en elipse azul se muestra punto exacto de medición. c) Vista en detalle del punto.

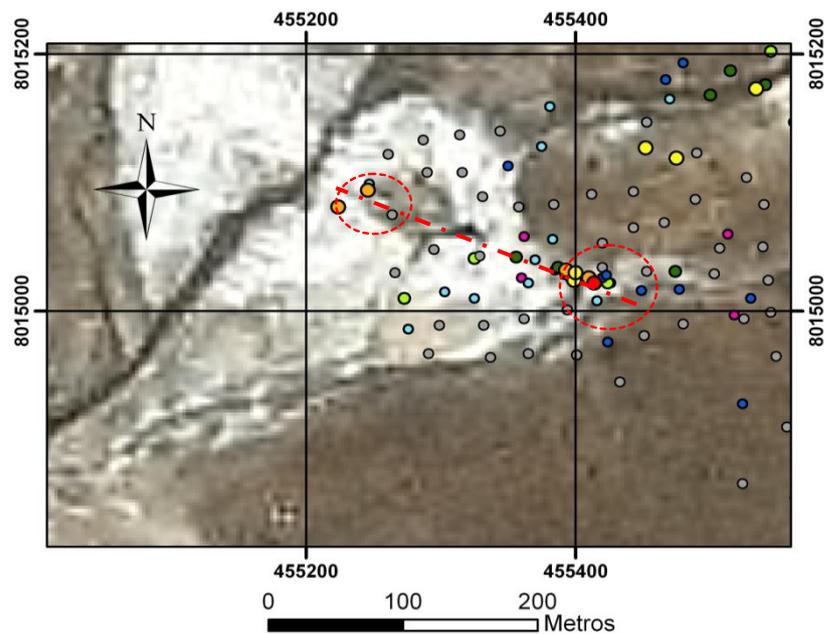


Figura 4.37. Alineamiento de altos valores de flujo de $\text{CO}_2\text{-DDS}$ en sector de manantiales termales en BS4, ver fig. 4.17.

En BS4, también se registra un lineamiento WNW-ESE de valores altos de flujo de $\text{CO}_2\text{-DDS}$ (fig 4.37). Este queda demarcado con dos sectores de mediciones en los extremos (fig. 4.38-4.39). A lo largo de este tramo se encuentran afloramientos de aguas, precipitados minerales amarillos-verdosos, similares a azufre y estructuras circulares, similares a las registradas en las zonas de mayores anomalías (fig. 4.40).

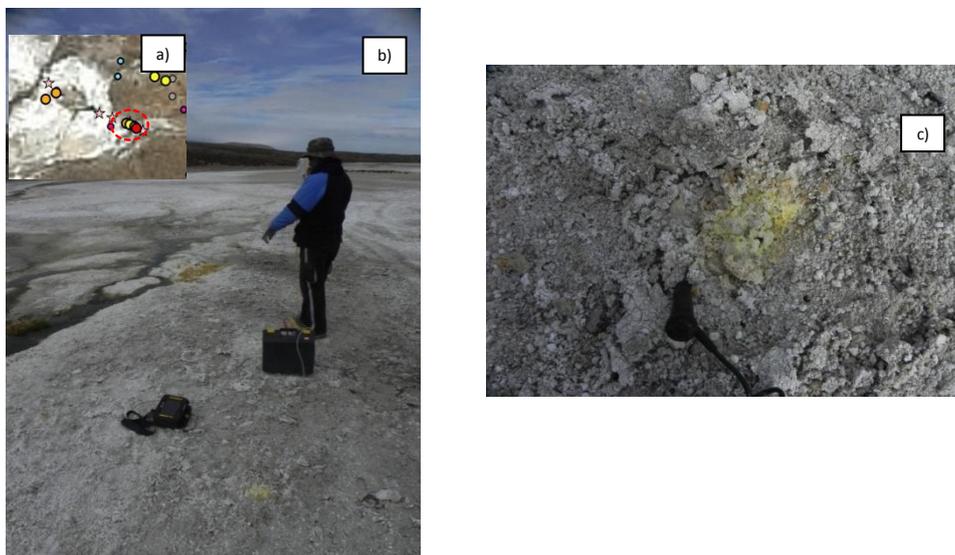


Figura 4.38. a) Ubicación de uno de los sectores extremos del lineamiento en BS4, ver fig. 4.17. b) Ubicación en terreno del punto de mayor flujo de $\text{CO}_2\text{-DDS}$ en planta. c) muestra en detalle.



Figura 4.39. a) Ubicación del otro sector extremo del lineamiento en BS4, ver fig. 4.17. b) Ubicación en terreno del punto de mayor flujo de CO₂-DDS en planta. c) Vista en detalle.

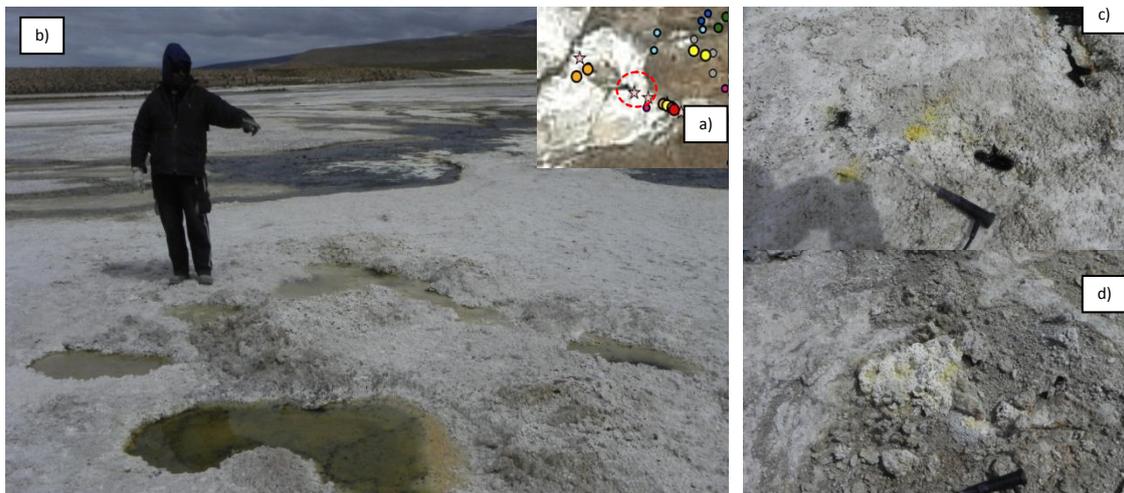


Figura 4.40. a) Ubicación del sector medio del lineamiento en BS4 en planta, ver fig. 4.17. b) Ubicación en terreno. c) Precipitados de minerales amarillos muy cercano a pequeñas surgencias de manantiales termales. d) Estructura similar a las circulares con zonación de sales.

En BS4, en el sector sur del lineamiento mencionado, cerca de un manantial termal se registra un máximo de flujo de CO₂-DDS. En tal punto se colectó una muestra para ser analizada por DRX (COLR-139A sales amarillas, COLR-139B sales blancas y COLR-139C sales grises parduzcas). Los resultados de los minerales encontrados en esas muestras se expresan en tabla 4.9.

Tabla 4.9. Resultados DRX en muestras de estructuras circulares en BS3 y BS4.

Muestra	Halita	Yeso	Sasolita	Otro
COLR-138A	▲	▲		Polihalita
COLR-138B	▲	▲		Ulexita Sanita
COLR-139A	▲	▲	△	
COLR-139B	▲	▲	△	
COLR-139C	▲	▲	△	

Además, se cuenta con otro análisis DRX de otras muestras de precipitados, tomados en la zona del Bofedal por EASA (2011), tabla 4.10.

Tabla 4.10. Resultados DRX en muestras del Bofedal de Colpitas (EASA, 2011).

Muestra	UTM		Mineral								
	E	N	Cuarzo	Opalo CT	Opalo A	Sulfuro	Halita	Ulexita	Calcita	Plagioclasa	Otros
Colpi-1	454728	8015572							▲	▲	Magnesiohomblanda
Colpi-2	454010	8015654									Hierro amorfo- oxihidróxido
Colpi-3	455417	8015901							▲	▲	Magnesiohomblanda
Colpi-4A	455624	8015182	▲	▲	▲						
Colpi-4B	455624	8015182				▲					
Colpi-5A	455637	8014324			▲						
Colpi-5B	455637	8014324	▲	▲	▲						
Colpi-6	456085	8016723	▲							▲	Caolinita, Jarosita, illita / illita-smectita?
Colpi-7A	455631	8015347	▲		▲	▲					
Colpi-7B	455631	8015347				▲					
Colpi-8	455420	8015021					▲	▲	▲	▲	Revdite?
Colpi-9	455420	8014991					▲	▲	▲		
Colpi-10	455420	8015021		▲	▲				▲	▲	

4.1.2.2 Grilla de nivel base

En esta grilla se midieron 13 puntos, de los cuales solo 9 tuvieron flujo positivo. Los resultados de la grilla de medición de flujos de CO₂-DDS se muestran en la figura 4.41. El resumen estadístico de estos, se presenta en la tabla 4.11.

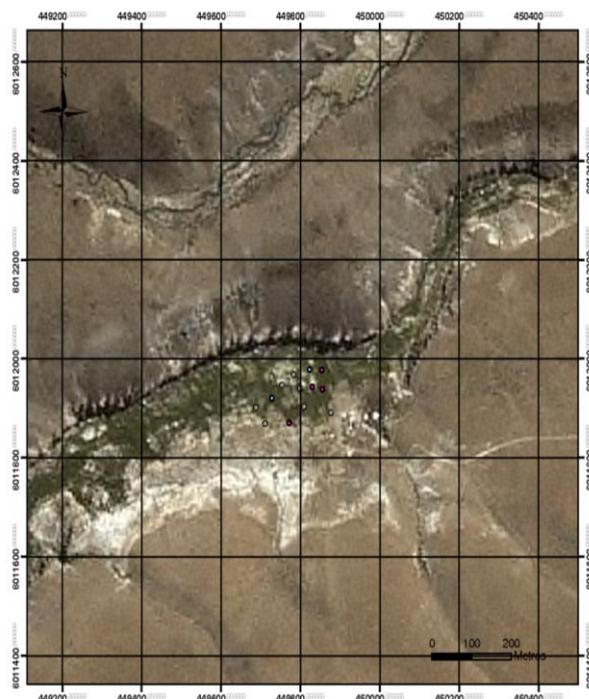


Figura 4.41. Distribución y magnitud de flujos de CO₂-DDS medidos en la grilla de nivel base.

Tabla 4.11. Estadística simple de las mediciones de CO₂-DDS segunda campaña Colpitas.

Resumen resultados primera campaña Colpitas	
Nº mediciones/Nº eflujos positivos	13/9
Flujo máximo CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	4
Flujo promedio CO ₂ -DDS [gm-2 d-1]	2
Desviación estándar flujo CO ₂ -DDS	1

El sector de mediciones presentaba condiciones similares a las del sector del Bofedal de Colpitas. Esto porque tiene como sustrato a la Ignimbrita Lauca y porque presenta un humedal. Los flujos de CO₂-DDS son bajos y no muestran gran dispersión en torno al promedio. Es por esto, y por encontrarse a 6,5 Km de distancia, que se le puede considerar sin influencia hidrotermal. Este dato es importante, debido a que muestra cual sería el nivel base o normal de CO₂-DDS en el suelo debido a factores biológicos y/o hidrológicos.

Por último, con los datos de flujo de CO₂-DDS obtenidos en el bofedal de Colpitas se puede realizar una estimación mínima de cantidades de CO₂ liberado a la atmósfera. Para esto, simplemente se sumaron los flujos medidos (sin incluir calicatas) y se multiplicó esa cifra por la cantidad de puntos medidos, que equivale a la superficie donde se midió, ya que los flujos están normalizados a m². De esta forma, se está calculando la cantidad de masa total de CO₂ liberada por unidad de tiempo. Luego, se la divide por el área total medida, que corresponde a toda la superficie abarcada por los puntos de medición. Para finalmente transformar la unidad estándar ocupada por la unidad [T Km⁻² año⁻¹]. El resultado arrojó una cifra de 76047 [T Km⁻² año⁻¹].

4.2 Resultados análisis estadísticos flujo CO₂-DDS

Como se explicó antes, el método GSA intenta identificar cuántas poblaciones o fuentes de CO₂-DDS existen en una zona de estudio. Para esto conjuga la utilización de un histograma y de un gráfico de probabilidades acumuladas.

4.2.1 Juncalito

Los datos de flujo muestran a grandes rasgos una distribución cercana a lognormal con datos concentrados en torno a 0,88 [g m⁻² d⁻¹], como se ve en el histograma de flujo de CO₂-DDS (fig 4.42).

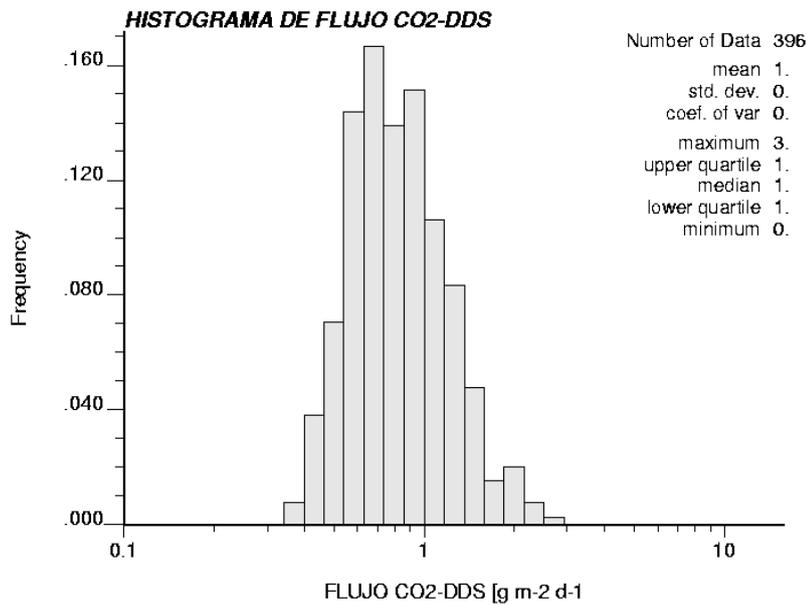


Figura 4.42. Histograma de flujos de CO₂-DDS en escala logarítmica para el sistema geotermal de Juncalito.

El gráfico de probabilidades acumuladas de estos datos se ilustra en la siguiente figura. En éste se reconoce una curva casi lineal, sin cambios de curvatura, con distorsiones solo en los bordes, lo cual es normal.

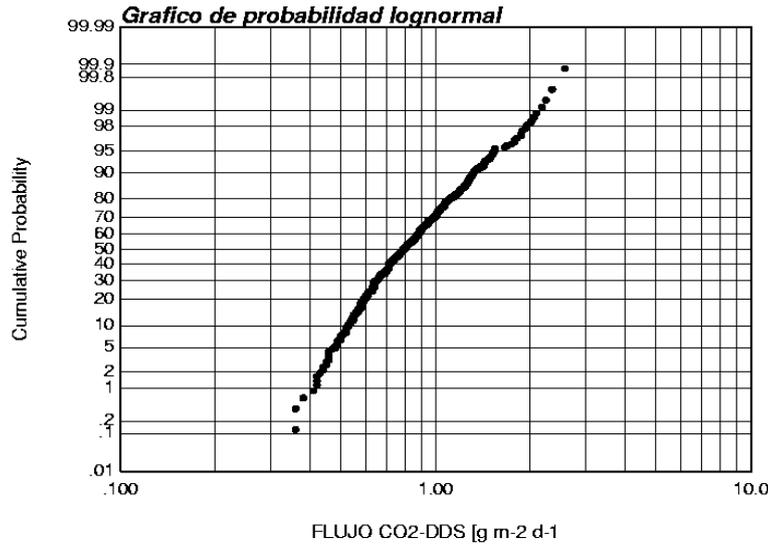


Figura 4.43. Gráfico de probabilidades acumuladas de flujos de CO₂-DDS en escala logarítmica para el sistema geotermal de Juncalito.

4.2.2 Colpitas

Para efectos del tratamiento de datos, no se consideraron las mediciones realizadas sobre las calcatas, debido a que no son comparables con el resto de los registros. Esto debido a que no tienen el efecto impermeable de la cobertura de suelo superficial, en general conformado por gravas. Los datos presentan más de una moda, una entorno a 1, una entorno a 10, otra cerca de 300 y la última cerca de 1400 [g m⁻² d⁻¹]. Su distribución es algo compleja, pero destaca que la mayoría de los datos están concentrados bajo los 10 [g m⁻² d⁻¹]. Además, se reconoce una distribución irregular entre los 20 y 100 [g m⁻² d⁻¹]. Por último, se observan 2 cúmulos de datos concentrados alrededor de las dos modas de mayor valor de flujo (fig. 4.44).

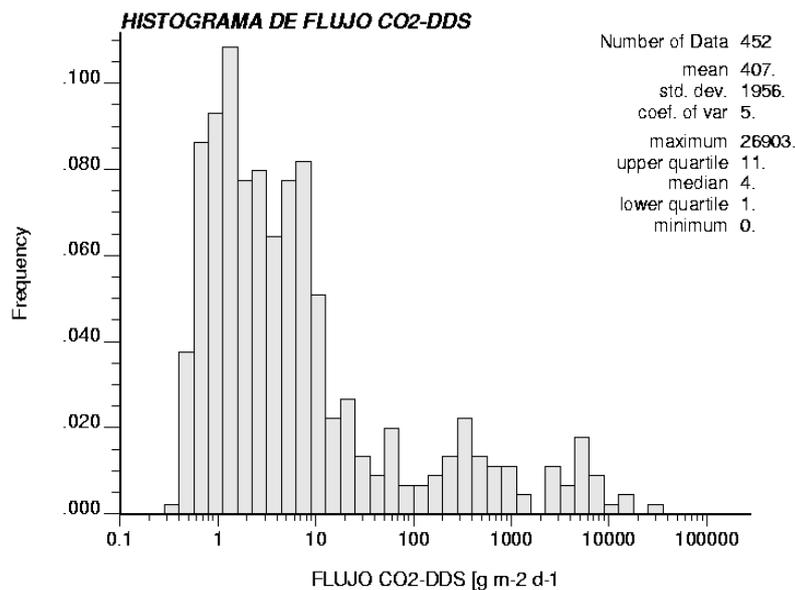


Figura 4.44. Histograma de flujos de CO₂-DDS en escala logarítmica para el sistema geotermal de Colpitas.

El gráfico de probabilidades acumuladas de estos datos se ilustra en la siguiente figura. En éste se observa una curva con un cambio de curvatura en torno a los 20 [g m⁻² d⁻¹].

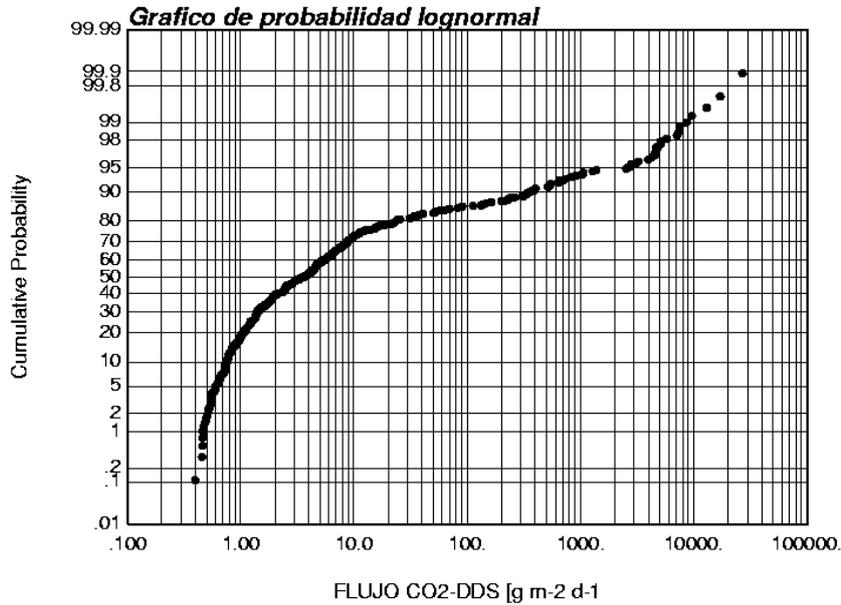


Figura 4.45. Gráfico de probabilidades acumuladas de flujos de CO₂-DDS en escala logarítmica para el sistema geotermal de Colpitas.

4.3 Resultados Geoquímica de aguas

Con el objeto de interpretar posibles procesos geoquímicos asociados a la presencia de CO₂ somero o profundo, se realiza un análisis de geoquímica de aguas, para identificar fuente de fluidos hidrotermales y procesos de interacción: agua/gas (ej. absorción de gases en aguas someras) y agua/roca (ej. Precipitación carbonatos). De esta forma, se pretende tener un mayor espectro de datos a ser correlacionados con los de CO₂-DDS.

A continuación se entregan los diagramas geoquímicos necesarios para la caracterización del agua en Juncalito y Colpitas. Se utilizaron:

1. Diagramas generales: Piper y ternario de aniones de Giggenbach.
2. Diagramas de elementos conservativos: ternarios de Cl-B-Li; de dispersión, Cl/B, Cl/Li.
3. Diagramas de dispersión de compuestos formadores de minerales.

El diagrama de Piper es útil para caracterizar aguas subterráneas en general, mientras que el de Giggenbach, en particular se utiliza para caracterizar aguas geotermales.

Dentro de los elementos conservativos se encuentran varios elementos, pero en este caso se considerará Cl, B, Li (Arnorsson, 2000). Sin embargo, no en todos los sistemas el Li se comporta igual. Para ello se debe realizar una comparación de razones con elementos que se consideren conservativos en general, como el B y el Cl.

Los diagramas de dispersión de elementos se realizaron con el afán de analizar el equilibrio entre las especies disueltas en el agua y los minerales precipitados en la zona, como se explicará en la discusión. Para estos diagramas se utilizaron unidades de [meq/l],

mientras que para los ternarios se utilizó [ppm]. En algunos casos se observó la existencia de una correlación lineal entre los datos ($R^2 > 0,9$) y fue demarcada en los gráficos por una recta en color azul. Mientras que la recta de pendiente 1, está graficada en color negro.

4.3.1 Juncalito

En esta zona, se considerarán 2 sectores de muestreo de aguas (fig. 4.46). La zona de Río Negro (ZRN), cercana a Llano Los Cuyanos, donde se tienen las mediciones de CO_2 -DDS, en ella se distinguen manantiales termales de (MT-RN) y aguas frías o con posible influencia termal (RN); y la zona de Río Juncalito (ZRJ), ahí también se separan en Baños termales (BRJ) y aguas frías o con posible influencia termal. Es en BRJ donde se tienen las muestras de gases libres (fig. 4.46). La distancia que separa a ambas zonas de manantiales es de aproximadamente 18 Km. Se tienen 21 muestras, colectadas en el verano del 2009 y en el verano del 2011.

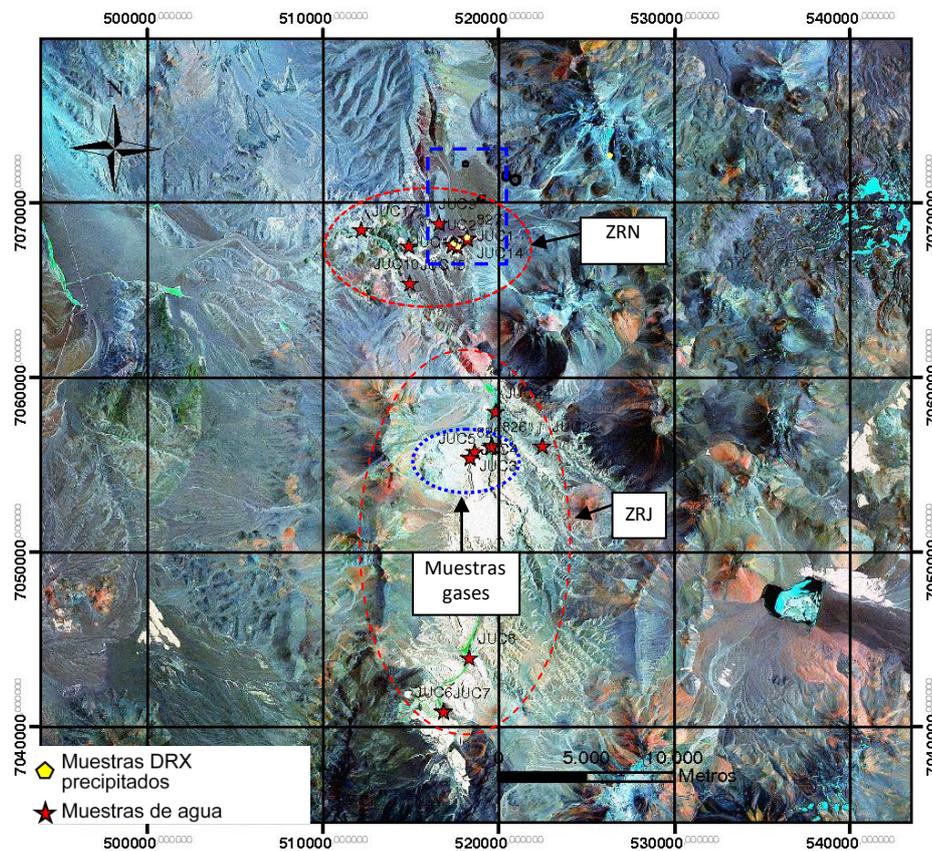


Figura 4.46. Ubicación de puntos de colección de muestras y sectores de RN y RJ, dentro de la zona de Juncalito. También se destaca la zona de medición de CO_2 -DDS con un recuadro azul.

La información acerca de las composiciones y condiciones físico-químicas de las muestras colectadas fueron entregadas oralmente por Catalina Mayorga.

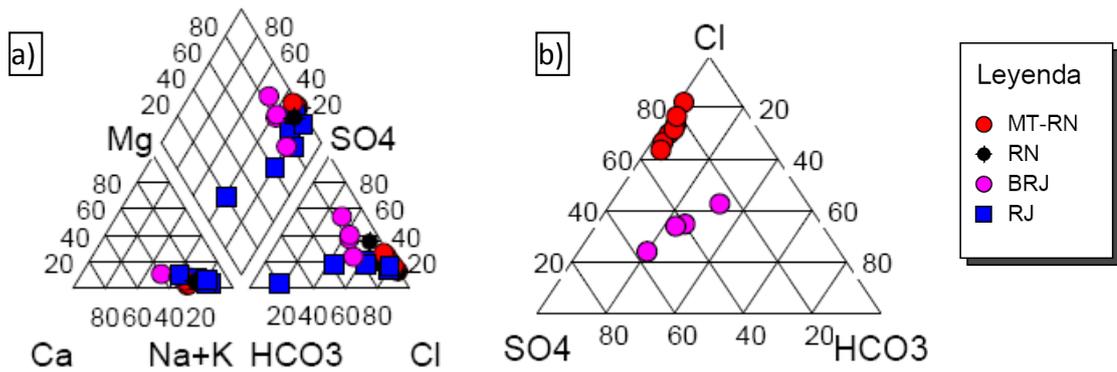
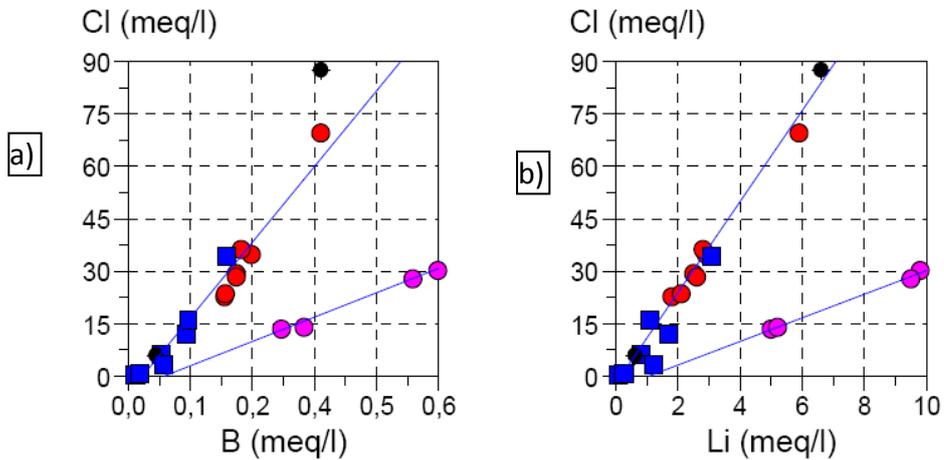


Figura 4.47. a) Diagrama Piper. b) Diagrama ternario de aniones de Giggenbach.

Según los diagramas de caracterización general (fig. 4.47), se distingue que las aguas de ZRN son cloruradas sulfatadas sódicas, y a partir de la geoquímica de aguas se obtiene que son de pH neutro a levemente básico entre 7,2 y 8,3, con temperaturas entre 27°C y 54°C, y con muy bajos contenidos de bicarbonato entre 26,1 y 62,2 ppm. En el caso de las aguas de ZRJ, se tiene un espectro mucho mayor de aguas, que va desde aguas bicarbonatadas hasta aguas cloruradas sulfatadas, con pH variable, cercano a neutro, entre 6 y 8,6, con temperaturas entre 7°C y 32°C, con contenidos de bicarbonato variable entre 50 ppm y 800 ppm. Las aguas de RJ (frías) tienen al bicarbonato como anión mayor, pero tienen muy bajas concentraciones del resto de los iones. En cambio, las aguas de BRJ alcanzan altas concentraciones de bicarbonato, comparables con las del Cl y SO4, por lo cual plotean al centro del diagrama de Giggenbach (fig. 4.47b). En éste se destaca que las muestras de BRJ tienen razones entre Cl y HCO₃ constantes, pero con concentraciones de SO4 variables. Es por esto que los resultados se tratarán por separado en el caso de ZRN y ZRJ.



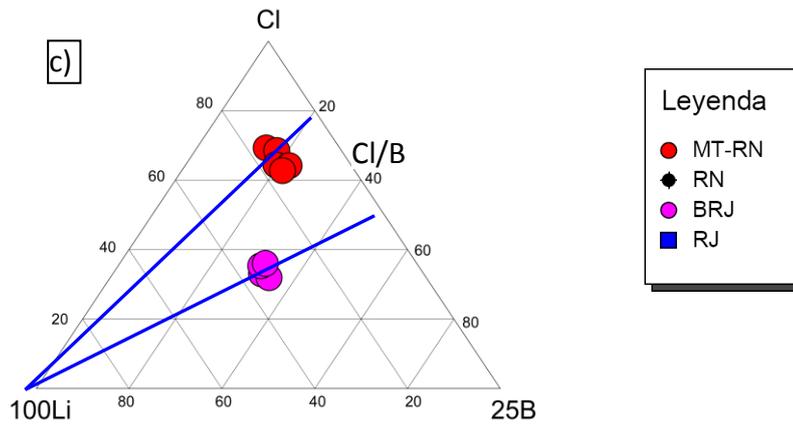


Figura 4.48. Diagramas de elementos conservativos, rectas en azul muestran correlación lineal. a) Diagrama Cl/B. b) Diagrama Cl/Li. c) Diagrama Cl-B-Li, modificado Giggenbach 1991.

En los diagramas de elementos conservativos, se identifica a través de 2 regresiones lineales que el Cl y B mantienen razones constantes en el agua (fig 4.48a). De esta forma, se observan 2 tendencias, separadas entre BRJ y el resto de las aguas. Siendo la de BRJ, la que muestra mayores razones B/Cl. Este comportamiento se repite en el diagrama Cl-Li (fig 4.48b), en donde las muestras de BRJ tienen mayores razones de Li/Cl. Luego, en el diagrama de Cl-Li-B (fig 4.48c), se distingue que las muestras se distribuyen en 2 grupos: el primero, cerca del centro del diagrama, conformado por las muestras de BRJ; el segundo, cercano al vértice del Cl, que concentra todas las muestras MT-RN.

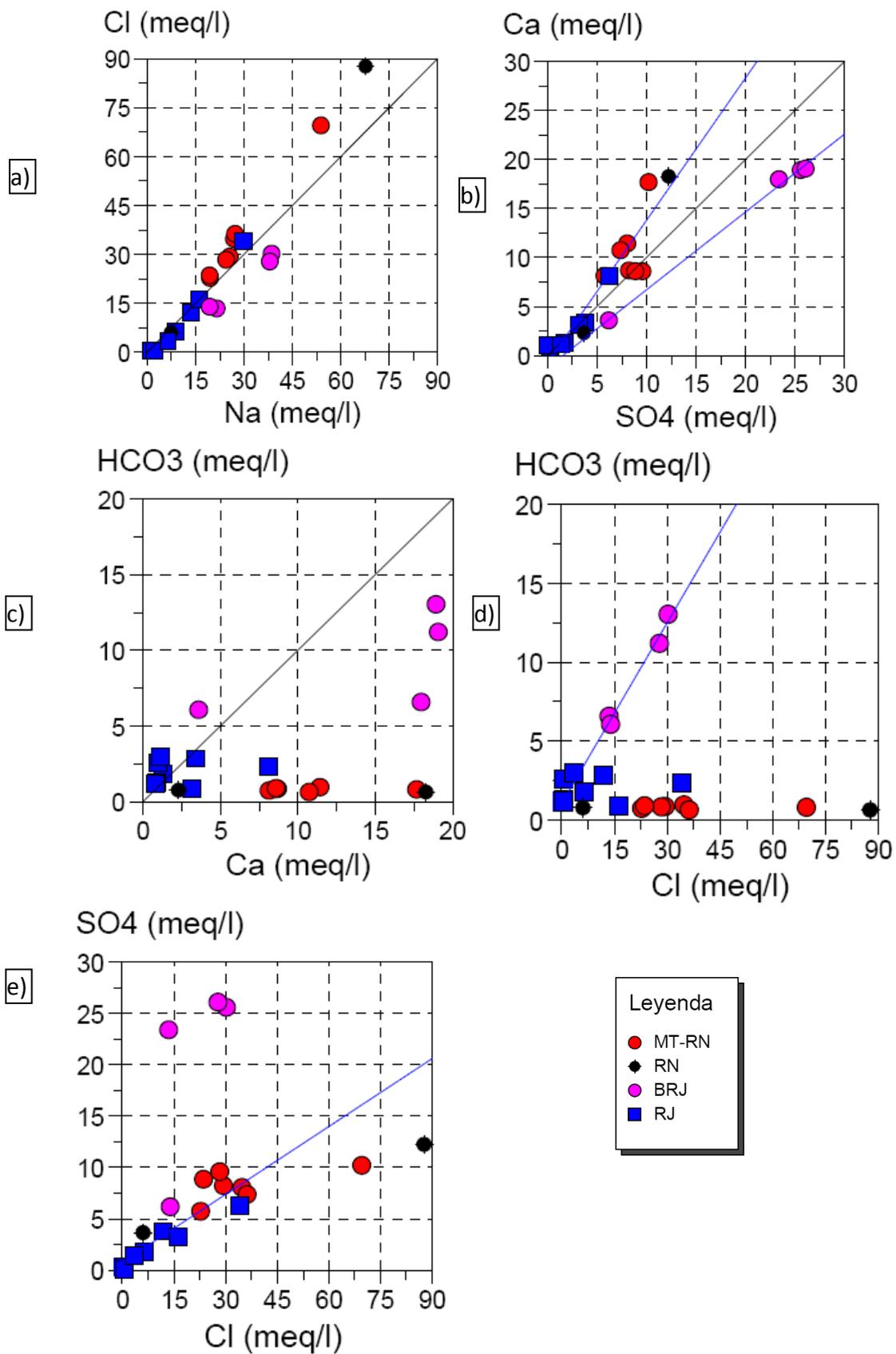


Figura 4.49. Diagramas de dispersión de elementos. a) Cl/Na. b) Ca/SO4. c) HCO₃/Ca. d) HCO₃/Cl. e) SO₄/Cl.

En la mayoría de los diagramas de dispersión de elementos se observan tendencias lineales, demostradas mediante regresiones lineales. Sólo en el diagrama HCO_3/Ca (fig 4.49c) no se observa ninguna relación. Por otro lado, la diferencia en el comportamiento de la muestras de BRJ con respecto a las demás, se destaca en casi todos los diagramas. Ésta diferencia se observa claramente en los gráficos de Ca/SO_4 y HCO_3/Cl (fig 4.49b-d), donde las muestras de BRJ tienen una razón constante diferente del resto de las muestras. Sólo en el gráfico de Cl/Na , todas las muestras siguen el mismo patrón de comportamiento, con una razón cercana a 1. Por medio de estos gráficos, también se observa que BRJ contiene mayores cantidades de HCO_3 y de SO_4 que el resto de las muestras.

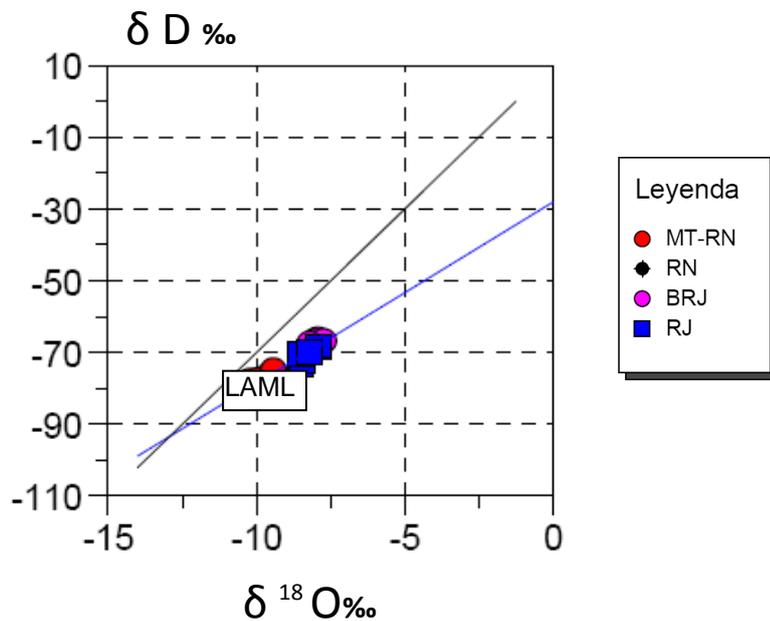


Figura 4.50. Gráfico de isotopos estables del agua.

Los datos de isótopos estables del agua (fig. 4.50) muestran un patrón lineal a través de una regresión lineal. Ésta tiene una pendiente relativamente baja (5). También muestran un desplazamiento de los puntos hacia la derecha con respecto a la línea de aguas meteóricas locales del Norte grande (LAML, con $\delta D = 7,8 \delta^{18}O + 9,7$).

4.3.2 Colpitas

En el entorno del sector del Bofedal de Colpitas se tienen muchas muestras, en este estudio solo se consideran las más cercanas a las mediciones de CO_2 -DDS Corresponden a 12 muestras colectadas desde el verano del 2010, hasta el invierno de 2011, separadas en: BN, bofedal norte; BS3, bofedal sur sector 3; bofedal sur, sector 4 (descritos en 4.2.1, fig 4.51).

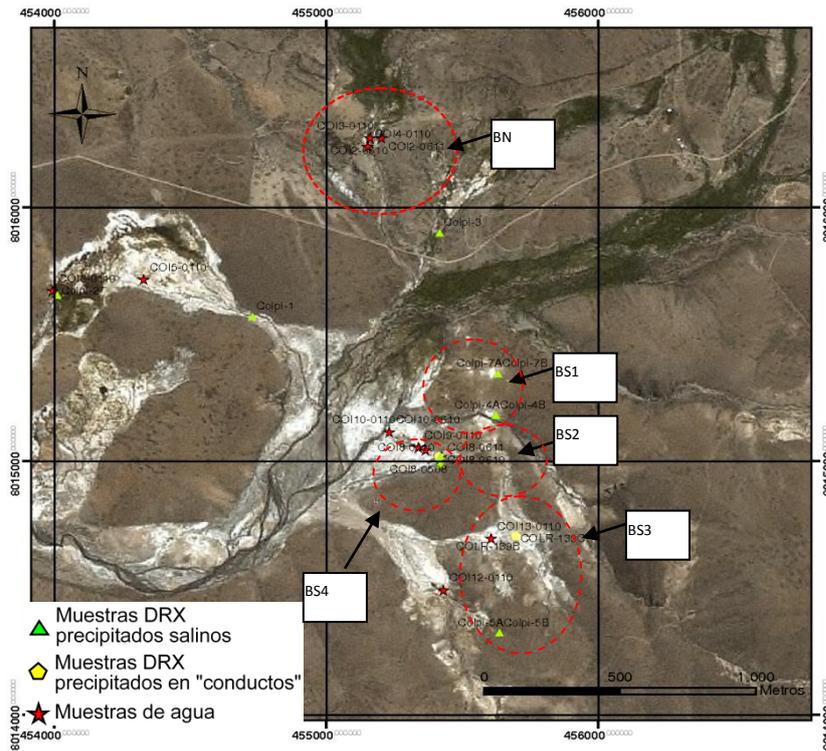


Figura 4.51. Ubicación de puntos de colección de muestras y sectores de BN, BS1, BS2, BS3 y BS4 dentro del Bofedal de Colpitas.

La información acerca de las composiciones y condiciones físico-químicas de las 16 muestras fueron entregadas oralmente por Catalina Mayorga

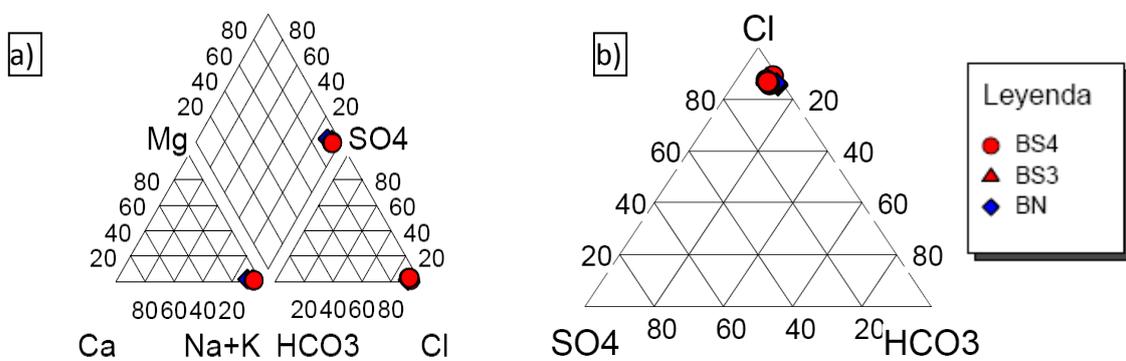


Figura 4.52. a) Diagrama Piper. b) Diagrama ternario de aniones de Giggensch

Según los diagramas de caracterización general (fig. 4.52), se distingue que las aguas del Bofedal de Colpitas son cloruradas sódicas. Además, de la química de aguas se obtiene que las aguas son de pH neutro a ligeramente ácido, entre 5,8 y 6,4, con temperaturas entre 27°C y 54°C, y altos contenidos de bicarbonato 510 y 852 ppm, pero no son comparables en concentraciones relativas con respecto al Cl, razón por la cual no se reconoce en el diagrama de aniones.

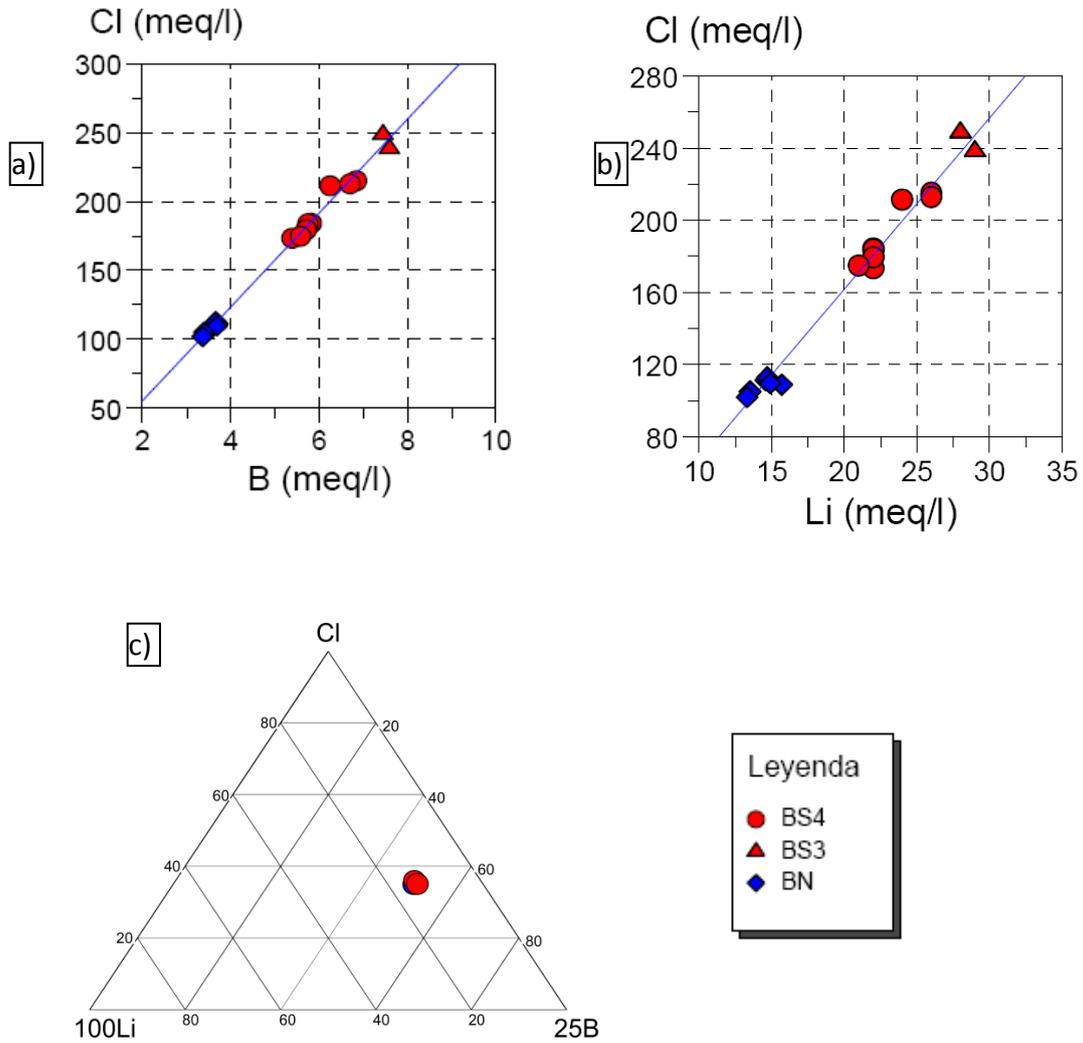


Figura 4.53. Diagramas de elementos conservativos, rectas en azul muestran correlación lineal. a) Diagrama Cl/B. b) Diagrama Cl/Li. c) Diagrama Cl-B-Li

En los diagramas de elementos conservativos, se identifica a través de una regresión lineal que la razón Cl/B se mantiene constante en el agua (fig 4.53a), así como también para el caso de Cl/Li (fig 4.53b). A partir del diagrama ternario de Cl-Li-B se identifica que las muestras se agrupan en un solo sector, lejos del extremo del Li, por las bajas concentraciones de este elemento, y ligeramente más cercano al vértice del B.

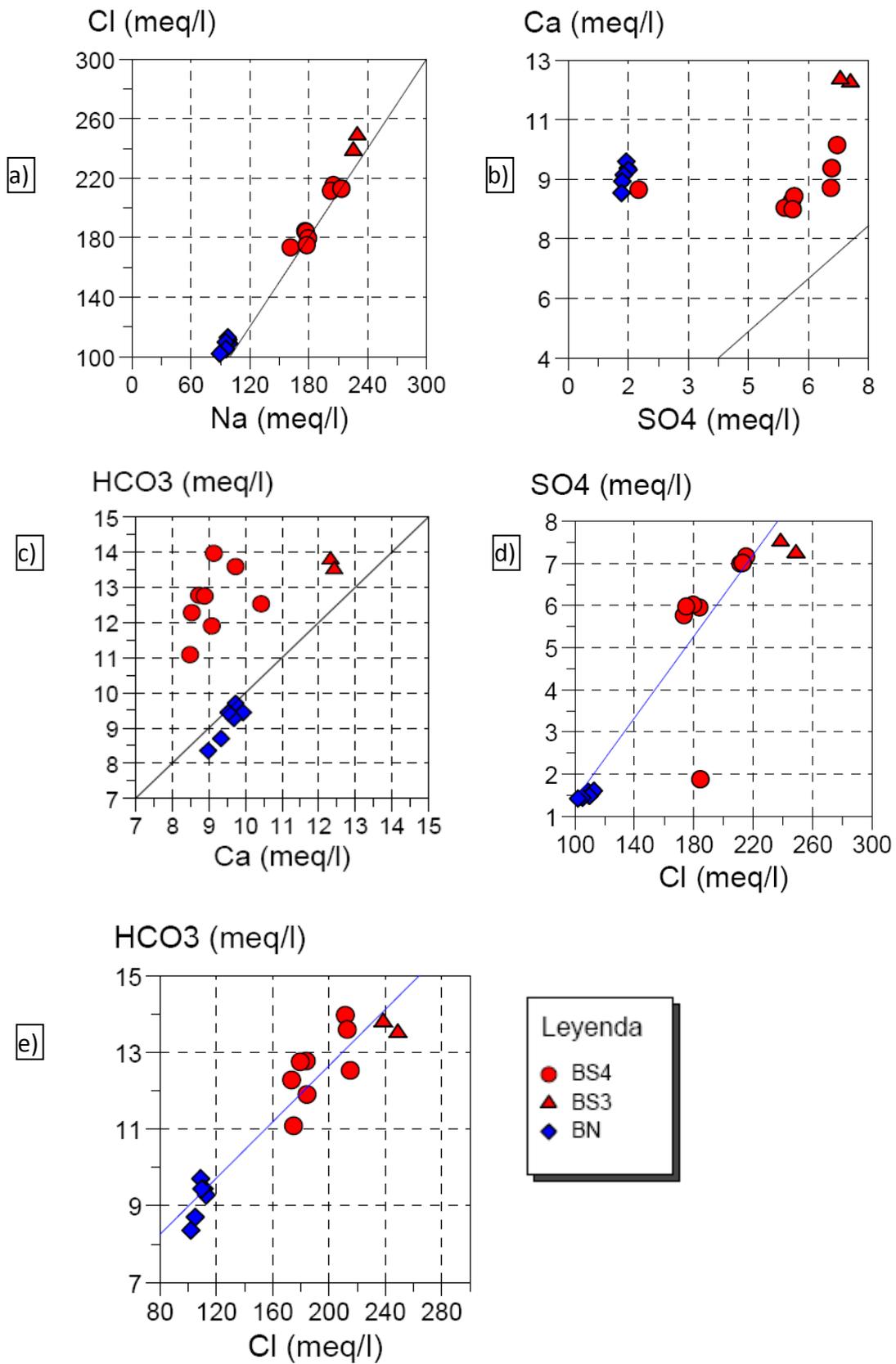


Figura 4.54. Diagramas de dispersión de elementos. a) Cl/Na b) Ca/SO₄ c) HCO₃/Ca d) HCO₃/Cl e) SO₄/Cl.

En los diagramas de dispersión de elementos se observan relaciones lineales, demostradas mediante regresiones lineales, entre algunas especies como Cl/Na, HCO₃/Ca, HCO₃/Cl y SO₄/Cl (fig 4.54a-c-d-e). Solo en el caso del Cl/Na la razón fue igual a 1, mientras que para el resto de los casos se observan distintas razones entre los elementos. Para el Ca/SO₄ no se encontró relación lineal (fig 4.54b).

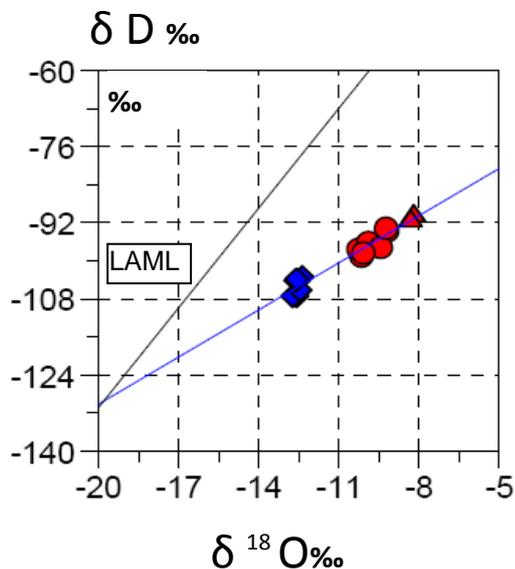


Figura 4.55. Gráfico de isotopos estables del agua.

Los datos de isótopos estables del agua se muestran en gráfico 4.55. En él se destaca un ordenamiento lineal de los datos con una regresión lineal. Ésta tiene una pendiente relativamente baja (3,3). Además se reconoce un desplazamiento de los puntos hacia la derecha con respecto a la línea de aguas meteóricas locales del Norte grande (LAML).

4.4 Resultados del δ¹³C-CO₂

Con la finalidad de aportar más información acerca del origen del CO₂-DDS, se analizan los datos del δ¹³C en el CO₂ de gases libres desde manantiales, ya que este parámetro funciona como trazador con distinta signatura para distintas fuentes. Los rangos encontrados en la bibliografía se presentan a continuación en la tabla 4.12 y en la figura 4.56

Tabla 4.12. Signatura del $\delta^{13}\text{C}$ relacionada al CO_2 derivado desde distintas fuentes (Modificado de Lewicki et al., 2004).

FUENTE CO_2	$\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ (‰)
Atmósfera	-7
Respiración de raíces de plantas y degradación oxidativa de materia orgánica joven en suelos	C3 ^{**} : -24 a -38 C4 ^{**} : -6 a -19
Degradación oxidativa de materia orgánica antigua en suelos	C3: -24 a -38 C4 acuático: -6 a -19
Rocas marinas carbonatadas	0±4
Geotermal	-2 a -6
Desgasificación magmática*	-5 a -9

(*) Dato extraído de Werner et al., 2006.

(**) C3 y C4: plantas que realizan fotosíntesis de manera distinta (Lewicki et al., 2004).

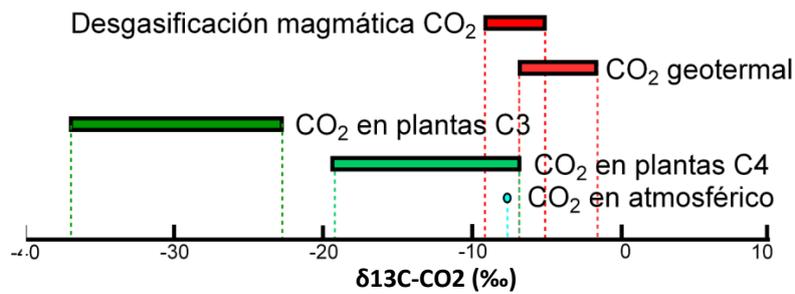


Figura 4.56. Signatura del $\delta^{13}\text{C}$ relacionada al CO_2 derivado desde distintas fuentes (Modificado de Lewicki et al., 2004)

4.4.1 Juncalito

Los datos del $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ obtenido en gases libres desde manantiales termales de Juncalito se presentan a continuación, en la tabla 4.13. Los manantiales desde los cuales fueron extraídos corresponden a los de Baños Río Juncalito (BRJ).

Tabla 4.13. Valores de $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ de las muestras de gases de Juncalito.

CODIGO	$\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ (‰)
JUC 3	-4,5
JUC 4	-8,6

4.4.2 Colpitas

Los datos del $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ obtenido en gases libres desde manantiales termales de Colpitas se presentan a continuación, en la tabla 4.14. La muestra COLPI-2 corresponde a una medición del BN y COLPI-10, corresponde a una del BS4.

Tabla 4.14. Valores de $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ de las muestras de gases de Colpitas.

CODIGO	$\delta^{13}\text{C-CO}_2$ (‰)
COLPI-2	-9,2
COLPI-10	-11,2

Capítulo 5. Discusión

Este capítulo se divide en 4 partes, primero se retoma el tema de aplicaciones del método de CO₂-DDS en el campo de la exploración geotérmica; después se interpretan los resultados de geoquímica de aguas; luego se discute acerca de los datos de flujo de CO₂-DDS; para terminar con la integración de la información disponible para realizar una interpretación de tipo modelo conceptual para cada zona.

5.1 Aplicaciones del método de CO₂-DDS

Las aplicaciones del método en el campo de la geotermia se centran en: identificación de estructuras de desgasificación difusa (EDD) y como guía para la identificación de la posible fuente de aporte del CO₂. Otras aplicaciones son: encontrar zonas más permeables para tener mayor recuperación de pozos productores (Fridriksson et al., 2009); correlacionar áreas de alto flujo de CO₂ con extensión areal de reservorios geotermiales en el subsuelo (Chiodini et al, 1995); utilizado como indicador de permeabilidad y como herramienta de prospección de reservorios de diferente temperatura (Chiodini et al, 1995); método de detección de sistemas geotermiales “ciegos” o “escondidos”, ya que en estos no hay manifestaciones termales en superficie, pero puede haber emisiones de gases como el CO₂, lo que puede ser interpretado como señales primarias de estos sistemas (Lewicki, 2005). La metodología base para lograr estas aplicaciones consiste en realizar grillas de medición de CO₂, para así generar mapas de flujos de CO₂ y con esto delinear estructuras de desgasificación difusa (EDD).

En el caso de éste estudio se discutirá acerca del origen del CO₂, de EDD, de los procesos y factores que lo afectan desde su fuente hasta la superficie.

5.1.1 Origen del CO₂

El CO₂ puede tener un origen antrópico o natural. Para efectos de este estudio, se considerará solo el natural, debido a que las zonas de estudio se encuentran lejos de la influencia del hombre. Éste puede tener origen en una fuente profunda o una fuente somera.

La fuente profunda puede ser caracterizada por desgasificación de un cuerpo magmático o de un reservorio bullente. En ambos casos, esto ocurre bajo el principio de exsolución, es decir, cuando un soluto no es capaz de mantenerse en solución. En este caso, el CO₂ que proviene desde el magma, debe pasar primero por una partición que lo lleva desde la fase magmática hacia la fase hidrotermal. Luego, otra partición desde ésta última fase, hacia una fase gaseosa. En el caso de desgasificación magmática, se dice que los cuerpos ígneos tienen 2 eventos de ebullición. El primero, ocasionado por la pérdida de solubilidad del agua en el magma, debido principalmente a un proceso de descompresión. Durante éste, se separa la fase hidrotermal de la fase magmática. El segundo, generado por un enfriamiento adiabático, ocasiona la cristalización de un magma y luego la separación de la fase gaseosa (de baja densidad, rica en volátiles ácidos) desde la fase hidrotermal, dejando una fase líquida (densa e hipersalina) (Fournier, 1987, extraído de Rye et al., 2005). En el nivel frágil dúctil se permitiría la separación de la pluma de vapor magmático y la salmuera salina.

Dentro de los gases exsultos se encuentran: principalmente vapor de agua, CO₂, SO₂ y/o H₂S y HCl (Giggenbach et al., 1987). El segundo proceso de partición le permite a los gases migrar hacia la superficie en forma independiente.

En el caso de desgasificación de un reservorio geotermal, el CO₂ puede provenir desde disolución de CO₂ magmático o por disolución de depósitos de carbonatos en profundidad, por procesos que serán explicados más adelante.

Por otro lado, la fuente somera depende fuertemente de los procesos que ocurren en el suelo. Entre ellos destacan: producción biológica de CO₂ (e.g. respiración del suelo), generada por la respiración de raíces y la degradación de la materia orgánica; desgasificación de CO₂ desde aguas subterráneas, que a su vez lo pueden incorporar desde respiración de raíces, desde la atmósfera y desde disolución de minerales carbonatados (e.g. depósitos de caliza); intercambio de CO₂ entre el suelo y la atmósfera, mediante difusión o advección (Lewicki, 2004-2005). Para efectos de este estudio, se considera que el CO₂ atmosférico tiene una concentración de aproximadamente 360 ppm (Lewicki et al., 2005). Por lo tanto, se puede resumir que la producción de CO₂ no hidrotermal, tiene 3 orígenes: biológico, hidrológico o atmosférico. Cabe destacar que cuando una fuente profunda está ubicada bajo un sistema de aguas subterráneas con una alta tasa de flujo, es probable que el CO₂ pueda ser incorporado por disolución en el agua y ser transportado lateralmente lejos del reservorio, generando aguas carbonatadas (Fridriksson, 2009).

Para identificar el origen del CO₂-DDS en este estudio se recurrió a la utilización del método GSA y a los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en gases libres de manantiales termales. Respecto del último punto, se utiliza el $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2(\text{g})$, la signatura isotópica de este elemento varía de acuerdo a su origen. Es por ello, que al contrastar el dato obtenido desde los gases con los rangos escritos en la literatura especializada, se puede inferir el origen del CO₂. Aunque en muchos casos, la interacción entre fluidos hidrotermales y gases de otro origen puede modificar esta signatura.

5.1.2 Procesos físico-químicos, condiciones geológicas y factores ambientales que intervienen durante el ascenso del CO₂

El flujo de CO₂-DDS es dinámico, depende de algunos procesos, condiciones geológicas y variaciones propias de un sistema hidrotermal, así como también de variaciones en parámetros ambientales (Granieri et al., 2003).

5.1.2.1 Procesos físico-químicos

Los procesos que pueden ocurrir con el CO₂ gaseoso o líquido (suponiendo un flujo profundo-hidrotermal) se resumen a continuación. Primero que todo tiene 2 posibilidades: una de ellas es ascender directamente hasta superficie y la otra, es disolución en acuíferos someros. La discusión se centrará en la disolución, proceso en el cual se puede generar el CO₂ (aq) y H₂CO₃ (ácido carbónico), como describen las ecuaciones (2) y (3). A su vez, el ácido carbónico, caracterizado como ácido débil, tiende a reaccionar con la roca, neutralizando los fluidos a través de disociación de H⁺ generando HCO₃ (bicarbonato) o CO₃ (carbonatos), como se muestra en las ecuaciones (4), (5), (6). Por lo tanto, una vez disuelto el CO₂ (g) en agua en un medio rocoso, existen 3 posibilidades: la primera, exsolverse del agua

por ebullición o por disminución de la presión del fluido durante su ascenso a superficie y seguir subiendo en fase gaseosa; la segunda, convertirse en bicarbonato por interacción agua/roca favorecida por tiempos de residencia prolongados; y por último, precipitar como carbonato, en presencia de suficiente Ca. Este tipo de reacciones se entiende mejor según los gráficos de especiación del carbonato (fig 5.1), que muestran las proporciones de cada especie según el pH del fluido. Es importante notar que la interacción de $\text{CO}_2(\text{g})$ con calcita en agua puede generar el doble de moles de bicarbonato como lo muestra la ecuación (7). Esta misma ecuación es capaz de mostrar el control que tiene el $\text{CO}_2(\text{g})$ en el proceso de disolución, como de precipitación de carbonatos, al entrar o salir del sistema respectivamente (C.A.J. Appelo, D. Postma, 2005).

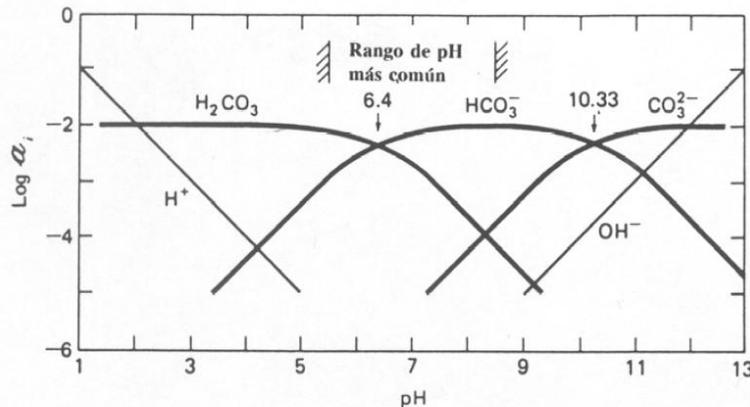
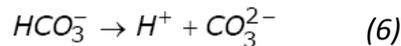
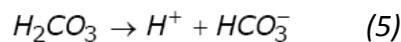
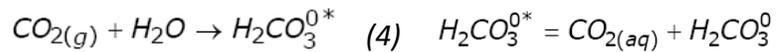
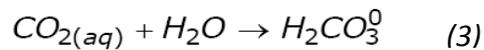
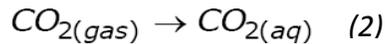


Figura 5.1. Diagrama de Sillen para el sistema carbonatado considerando una actividad de 10^{-2} moles/l de Carbono total. Ilustra las especies predominantes según el pH.

A modo de síntesis, el flujo profundo de $\text{CO}_2(\text{g})$ hidrotermal puede originar una signatura de alto flujo de CO_2 -DDS, incluso si es que existiese efecto de disolución de $\text{CO}_2(\text{g})$ en aguas, en condiciones que no favorezcan la interacción agua/roca, como en el caso de fluidos hidrotermales que ascienden muy rápido o disolución en aguas en constante ebullición. Sin embargo, la disolución en otras condiciones, como en acuíferos someros fríos, de gran espesor, con grandes tiempos de residencia antes de descargar en superficie, puede dar

origen a aguas ricas en bicarbonato o a precipitación de carbonatos en subsuperficie, disminuyendo los valores de flujo de CO₂-DDS. Ante este último escenario, cabe mencionar que si se generan aguas ricas en bicarbonato y éstas no pueden descargar en superficie o si precipitan carbonatos en subsuperficie, el problema se complejiza de gran manera, debido a que en ese caso se encubriría la evidencia de un flujo profundo.

5.1.2.2 Condiciones geológicas y su relación con el ascenso del CO₂(g)

Las condiciones geológicas dadas en un sistema hidrotermal influyen en el transporte, distribución y magnitudes de flujo de CO₂-DDS en superficie. Según Baubron et al. (2002), discontinuidades en la corteza, sean fracturas o fallas facilitan la desgasificación desde el subsuelo hacia la hidrósfera y la atmósfera. Estos flujos de gases pueden distribuirse ampliamente en manantiales termales sobre áreas tectónicamente activas. De acuerdo a este autor, los flujos de gases ocurren en 2 ambientes diferentes. El primero, en áreas de volcanismo presente o reciente, donde la fuga de gases se da en la parte central de centros de emisión y algunas veces en sectores distales, pero no de forma uniforme en el edificio volcánico, sino que en regiones restringidas, que Chiodini et al. (2001), llamó “Estructuras de desgasificación difusa”. El segundo, en áreas sísmicamente activas, donde en general existen evidencias de desgasificación preferencial cerca de fallas. Estos rasgos geológicos caracterizados por alta permeabilidad pueden actuar como conductos en la corteza, generando contrastes geoquímicos y de temperatura. Además, en zonas sísmicamente activas, la desgasificación puede ocurrir como flujos advectivos a través de suelos o áreas fracturadas y/o como fase gaseosa libre de mezcla exsuelta desde manantiales termales debido a descensos de presión durante el ascenso de los fluidos hacia la superficie (Toutain et al., 1999). En estas zonas sin volcanismo, distinto del contexto de este estudio, el CO₂ puede provenir de desgasificación del manto o metamorfismo de rocas carbonatadas a altas profundidades. Es por los antecedentes expuestos, que se comprende que anomalías de flujo de gas con ciertos patrones espaciales en zonas fracturadas o falladas pueden funcionar como herramientas para identificar estructuras tectónicamente activas. Aunque las limitaciones para estas investigaciones consisten en bajas concentraciones de gas desde la corteza en casos con gran cobertura sedimentaria y dilución atmosférica de gases en los suelos (Baubron et al., 2002).

Se señala incluso que en áreas de fracturas restringidas, los flujos de gases pueden tener patrones contrastantes. La explicación a este fenómeno está dada porque el gas puede provenir de diversas fuentes, así como también porque depende de la complejidad de los patrones estructurales, hidrológicos y litológicos de la zona de estudio (Baubron, 2002). Aunque estos patrones no son obvios en algunos lugares, se ha registrado la existencia de algunos parches aislados de altos flujos de CO₂-DDS que probablemente sean resultado de un aumento local de la permeabilidad cerca de superficie (Werner et al., 2006).

Como se ha mencionado, la permeabilidad juega un rol fundamental en el flujo de CO₂-DDS, ya sea primaria o secundaria, pues facilita la desgasificación. Pero en caso contrario, se espera que juegue un papel análogo, es decir, dificultar o reducir la desgasificación cuando las condiciones de permeabilidad sean muy bajas, como es el caso de litologías muy compactas, como lavas frescas o tobas soldadas, que no hayan sido afectadas por eventos de deformación o fracturamiento.

5.1.2.3 Factores ambientales

Como el uso del método de CO₂-DDS es relativamente reciente en exploración geotérmica, existen algunas hipótesis y pruebas que intentan entender cómo pueden afectar las condiciones ambientales a las concentraciones y flujos de CO₂ difuso desde el suelo. En este sentido, destacan las experiencias de Granieri et al. (2003) y Hinkle (1994), que realizaron series de tiempo con mediciones de flujo de CO₂-DDS. En estas, se reconoce que algunos factores externos, también llamados ambientales, pueden potencialmente influir en las concentraciones y flujos de CO₂ medidos en superficie o cerca de superficie. Dentro de estos, se consideran: parámetros meteorológicos (presión barométrica, temperatura del aire, humedad del aire, velocidad del viento y lluvia); propiedades del suelo (porosidad, conductividad hidráulica, humedad del suelo y temperatura del suelo) y los efectos topográficos (Granieri et al., 2003; Hinkle, 1994). Por último, se señala que las variaciones de flujo de corto plazo (ej. diurnas) se han relacionado a procesos externos, mientras que las de largo plazo a variaciones en procesos internos (Granieri et al., 2003).

Según el estudio de Hinkle (1994), existen variaciones anuales y diurnas del CO₂. Se señala que ambas están asociadas a variación de parámetros meteorológicos. En particular, los que más influirían serían: lluvia, caída de nieve y temperatura de aire y suelo. La explicación para estos factores se detalla a continuación: grandes cantidades de lluvia y de derretimiento de nieve podrían disolver o desplazar el CO₂ por infiltración de aguas; se registran mayores valores de concentraciones de CO₂ en verano y menores concentraciones cuando la temperatura del aire y del suelo están bajo temperaturas de congelación; un descenso en la presión podría permitir un que el CO₂ escape desde el suelo con mayor facilidad; un aumento en la humedad relativa, equivaldría a una lluvia ligera, formando una especie de barrera impermeable solo en el suelo superficial. En este mismo estudio, concluye que las variaciones anuales son mayores que las diurnas; las mediciones realizadas en un periodo corto y durante condiciones secas tienen menor efecto de las variables meteorológicas, aunque de cualquier modo, las concentraciones de CO₂ pueden variar cuando alguna de las variables ambientales varíe en gran medida; las variaciones en las concentraciones no siempre son instantáneas, éstas pueden responder a las variaciones ambientales con un tiempo de retraso. Esto no ocurriría con gases que se encontrasen en niveles más someros, en posible equilibrio dinámico con la atmósfera. En ese caso, sus concentraciones en superficie se verían rápidamente afectadas por los más mínimos cambios ambientales y por lo tanto sería imposible determinar los efectos de cada parámetro sobre las concentraciones de CO₂.

En el caso del estudio de Granieri et al. (2003), se observa que los parámetros ambientales que afectan mayormente son la humedad y la temperatura del aire, pero declara que sus resultados son aplicables sólo al campo geotermal particular estudiado. Para separar los efectos de los factores externos o ambientales, realiza un filtrado de datos, que consiste en relacionar de manera lineal la variación de los parámetros ambientales con las variaciones de flujos CO₂. De esta forma, muestra que las variaciones de la humedad del suelo y de la temperatura del aire son las que explican de mejor forma las variaciones de flujo. Sin embargo, reconoce que no existe una relación lineal confiable entre los parámetros medidos y el flujo de CO₂, lo cual puede ser explicado porque el factor ambiental determinante de las variaciones del flujo no fue medido o porque no tienen una relación de tipo lineal.

La conclusión presentada por estos autores es que no hay claridad respecto a cual de ellos es o son determinantes en las variaciones de CO₂-DDS. La única conclusión que presentan estos autores es que dependería de cada sistema hidrotermal.

5.2 Geoquímica de aguas

En ambas zonas de estudio se reconocen aguas con altas concentraciones de Cl, de pH cercano a neutro. En general, el Cl se interpreta como proveniente de un sistema hidrotermal profundo, su origen se remonta al HCl exsuelto desde cuerpos magmáticos (Giggenbach et al., 1991). Pero en el contexto del norte de Chile, no se tiene certeza del origen del Cl, puesto que también puede provenir de sales de depósitos evaporíticos o marinos. Además, se midieron altas concentraciones de bicarbonato. Las aguas bicarbonatadas, en general son interpretadas como resultado de la interacción agua/roca después de la disolución de CO_2 (g) en el agua; o bien, de la disolución de carbonatos a lo largo del recorrido del fluido en el subsuelo. Estas aguas reciben el nombre de periféricas (Giggenbach et al., 1991), es decir, que afloran hacia los bordes del área termal.

Los elementos conservativos o trazadores son los elementos que una vez que entran en la fase fluida se conservan en ella (como cantidades absolutas de soluto). En general, el Cl y el B se comportan como conservativos, pues sólo forman sales solubles en sistemas geotermales (Arnórsson, 2000), pero el Li y otros no siempre se comportan como conservativos. Para saber su comportamiento, se usan gráficos de dispersión entre el Cl o B y los elementos a analizar, ya que si mantienen razones constantes en las aguas, significa que mantienen cantidades de soluto y entonces son conservativos. Esto ocurre porque al comparar razones se deja fuera el efecto de dilución o evaporación (variaciones en los volúmenes de agua medidas en las concentraciones) y sólo se miden variaciones de las cantidades de soluto en el agua del sistema. Cuando los elementos conservativos muestran una sola tendencia, dada por una razón constante entre ellos, se considera que las aguas tienen el mismo origen.

Dentro de los elementos no conservativos o geoindicadores se incluyen, el Na, Ca, K, Mg y otros compuestos, que son capaces de alcanzar equilibrios locales en distintos sectores del sistema hidrotermal, en general a través de la precipitación de minerales secundarios desde los fluidos (Arnórsson, 2000). Sus concentraciones se ven afectadas por procesos de evaporación/dilución o precipitación/disolución, frente a cambios de condiciones físico-químicas.

Como se tienen resultados de análisis de precipitados minerales cerca de los manantiales, entonces se hace especial hincapié en realizar diagramas de dispersión para los elementos que componen estos minerales. A fin de determinar si las aguas están en equilibrio o no con esos minerales.

La interpretación de los gráficos de dispersión de elementos componentes de minerales realizada en este trabajo, consiste en comparar los datos de las aguas con respecto a la recta de pendiente igual a 1. Por ejemplo, para analizar el equilibrio entre las aguas y la halita, se realiza un gráfico de dispersión entre Cl y Na. Debido a que el mineral está formado de un mol de Na^{1+} y un mol de Cl^- , para solucionar el problema de las cargas se ocupan unidades de [meq/l]. Cuando la razón entre ellos es uno, supone que el mineral está en equilibrio con las aguas por interacción agua/mineral y que ese mineral puede estar controlando tal equilibrio. Mientras que si está por sobre o por debajo de la recta, muestra un exceso relativo de un elemento con respecto al otro, posiblemente indicando la existencia de otra posible fuente para ese elemento. En otro caso, podría indicar escasez relativa de un elemento con respecto a otro, lo cual puede significar que una fuente este consumiendo este elemento. Otro modo de analizar este último punto, excesos o ausencias relativas de elementos, es que el mineral analizado no es el que controla las concentraciones de estos

elementos en el agua. Por lo tanto, la interpretación para estos diagramas puede ser muy amplia y tener una gran incertidumbre. Es importante señalar además, que las muestras de agua se pueden comparar con los precipitados minerales, sólo cuando ambas pertenecen al mismo lugar.

5.2.1 Juncalito

Como ya se mencionó, las aguas de ZRN y ZRJ difieren en cuanto a sus características, por lo tanto serán analizadas por separado. En ZRN, se reconocen aguas cloruradas sulfatadas, de pH cercano a neutro. Según Giggenbach (1991), éstas aguas, que grafican muy cerca del Cl/SO₄ en el diagrama ternario Cl/SO₄/HCO₃, se interpretan como aguas volcánicas, es decir, que absorbieron gases volcánicos de alta temperatura con altos contenidos de HCl. Pero como ya se mencionó, en el Altiplano de Chile no se tiene certeza acerca del origen del Cl. Además, en las aguas de ZRN se registraron muy bajas concentraciones de bicarbonato. Este hecho será discutido más adelante.

En el sector de ZRJ, las aguas tienen una mayor diversidad de concentraciones de componentes principales. Pero se dará mayor importancia a las aguas termales. En el diagrama de Giggenbach (fig. 4.47b), se reconoce que las aguas BRJ plotean cerca del centro del triángulo y siguen un patrón lineal con razón Cl/HCO₃ constante hacia el vértice de SO₄. Este rasgo podría indicar mezcla de aguas o aporte de SO₄ en estos componentes por absorción de gases.

Los diagramas de elementos conservativos muestran que el Cl, B y Li se comportan como elementos conservativos ya que mantienen razones constantes entre ellos (fig 4.48.a-b). Pero destacan que existen 2 tendencias distintas, una para el grupo de las muestras de BRJ y otra para el resto. BRJ tiene mayores razones, tanto de B/Cl como de Li/Cl. Este comportamiento se ve reflejado en el diagrama ternario de Cl, B, Li (fig. 4.48.c), en donde el primer grupo (BRJ), muestra mayores razones B/Cl y mayores concentraciones de Li, en comparación con el segundo grupo (MT-RN). De esta forma se pueden interpretar distintas fuentes para las aguas termales de BRJ y MT-RN.

Tabla 5.1. Resumen de análisis DRX sobre precipitados en el sector de RN.

Código muestra	Localización	Yeso	Halita	Calcita	otros
827A	Baños de Río Negro (BRN)		x		bernalita (Fe(OH))
827B	Baños de Río Negro (BRN)				
827C	Baños de Río Negro (BRN)		x		bernalita
JUC2	Sector de MTs en parte media Río Negro (MTRN)				
JUC2B	Sector de MTs en parte media Río Negro (MTRN)				ilita/flogopita, anf?
JUC100	Sector de MTs en parte media Río Negro (MTRN)				

Con respecto a los diagramas de dispersión de elementos para analizar equilibrio, se pueden comparar las muestras de agua con los precipitados minerales sólo en RN (Tabla 5.1) en particular, en cuanto a yeso y halita. De todos los gráficos, sólo se puede hablar con certeza del diagrama Cl/Na (fig. 4.49a), en el cual se reconoce que las aguas están en equilibrio con halita por plotear cerca de la recta de pendiente igual a 1. Esto es consistente con la presencia de halita en BRN. En este caso, se dice que la halita es el mineral que controla las concentraciones de Cl y Na en el agua y puede señalar disolución de halita en profundidad o en superficie. Para el resto de los diagramas, no se observa una relación entre pendientes igual a 1 y presencia del mineral correspondiente. Pero se destaca que las muestras de agua de BRJ tienen una signatura distinta de las muestras de MT-RN, con mayores concentraciones de HCO_3 y SO_4 .

A modo de resumen del análisis realizado, se destaca que las principales diferencias que presentan las muestras de BRJ con respecto a las de RN son: presencia de gases libres; mayores razones de B/Cl y Li/Cl; mayores concentraciones de SO_4 y HCO_3 ; y menores temperaturas. Con estos datos, se puede interpretar que existe una fuente diferente de aguas termales para ZRJ, dada por la diferencia de razones de elementos conservativos. Además, se infiere que los gases libres y las altas concentraciones de SO_4 y HCO_3 pueden ser resultado de la incorporación de gases desde una posible desgasificación magmática profunda, de $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ y CO_2 respectivamente (Giggenbach et al., 1997). Esto debido a que ha sido estudiado que las composiciones de los gases libres en manantiales termales (a

temperatura menor que la de ebullición de agua) asociados a sistemas geotérmicos, son principalmente CO_2 y H_2S . Con respecto a las aguas de ZRN, se puede interpretar que corresponde a un sistema hidrotermal con aguas de tipo volcánicas (Giggenbach, 1991) dadas las mayores temperaturas de la zona, con absorción de gases volcánicos. Pero esta interpretación es un poco incierta, debido a que faltan evidencias que coinciden con este tipo de aguas, como por ejemplo, presencia de fumarolas o manifestaciones con emanaciones de gases libres.

Con respecto al estudio de isótopos estables del agua (fig. 4.50), la razón constante de los datos y el enriquecimiento de $\delta^{18}\text{O}$ y de δD con respecto a LAML se pueden interpretar como la presencia de una componente de evaporación y una de interacción agua/roca, aunque podría ser sólo evaporación. De este gráfico no es posible inferir interacción de CO_2 (g) profundo con las aguas (en tal caso, las muestras tendrían un desplazamiento hacia la izquierda de la LAML o empobrecimiento de $\delta^{18}\text{O}$).

5.2.2 Colpitas

En el Bofedal de Colpitas se reconocen aguas cloruradas (fig. 4.52), de pH cercano a neutro. Este tipo de aguas, clásicamente se interpreta como aguas termales de un sistema hidrotermal maduro (Giggenbach et al., 1991). Además, se midieron altas concentraciones de bicarbonato, el cual, como ya se explicó, puede ser interpretado como resultado de la interacción agua/roca después de la disolución de CO_2 (g) en el agua o bien como resultado de la disolución de carbonatos.

Con respecto a los elementos conservativos, se considera que en Colpitas, el Cl, B y Li se comportan como conservativos, ya que muestran razones constantes (fig 4.53.a-b). En este caso, con una sola tendencia, lo cual se interpreta como una sola fuente de aguas termales. En el diagrama ternario de Cl, B, Li, se reafirma este hecho.

Con respecto a los diagramas de dispersión de elementos para analizar equilibrio, se pueden comparar las muestras de agua con los precipitados minerales en bofedal Sur (BS4) con las muestras de DRX COLPI-8, COLPI-9, COLPI-10, COLPI-138 (A y B); bofedal Norte (BN) con la muestra COLPI-3 (tabla 4.9-10).

El análisis DRX de los minerales de alteración muestra presencia de halita, yeso, calcita y boratos, como ulexita, santita y posible sassolita. Los resultados de los diagramas de dispersión realizados muestran que sólo en el diagrama de Cl/Na y HCO_3/Ca se reconoce equilibrio entre las aguas y una fase mineral. En el primer caso la razón Cl/Na es muy cercana a 1 (fig.4.54a), lo cual indica saturación de halita en las aguas y es consistente con la presencia de halita. Esto puede indicar disolución de halita, sea ésta en niveles del subsuelo o en superficie. Con respecto al Ca, es interesante notar que tiene concentraciones constantes tanto en el bofedal norte como en el sur. Pero sólo para las aguas del BN muestra aguas cercanas al equilibrio y presencia de calcita. El resto de los datos puede tener una interpretación muy amplia, pero lo que se distingue claramente de estos gráficos es la mayor concentración que muestran las aguas del BS en cuanto a HCO_3 y a SO_4 .

A partir del análisis realizado, se resume que las características más importantes que presentan las aguas del Bofedal de Colpitas son: gases libres en manantiales termales; altas concentraciones de cloro y bicarbonato; y razones constantes de Cl/B y Cl/Li marcando una sola tendencia. Con estos datos, se puede interpretar una misma fuente de sistema hidrotermal en la zona, en donde los gases libres y el alto contenido de bicarbonato pueden

indicar una desgasificación magmática, por absorción de CO_2 (g). Cabe señalar que el menor contenido de HCO_3 y SO_4 de las aguas del BN, puede explicarse por estar a una mayor cota, implicando una disolución de los gases en niveles más profundos, probablemente a la misma cota del BS. Aunque también podría ser explicado porque los flujos de CO_2 desde la fuente son heterogéneos en cuanto a su distribución.

Otro aspecto interesante de los diagramas de dispersión de elementos es el que se da entre Cl/HCO_3 y Cl/SO_4 (fig. 4.54e-f), que muestra una correlación lineal entre ellos, indicando que la variación de uno de ellos influye en la variación del otro.

La razón constante entre los datos de isótopos estables del agua y el enriquecimiento de $\delta^{18}\text{O}$ y de δD con respecto a LAML (fig 4.55) se pueden interpretar como la presencia de una componente de evaporación y una de interacción agua/roca, aunque podría ser solo evaporación. De este gráfico no es posible inferir interacción de CO_2 (g) profundo con las aguas (en tal caso, las muestras tendrían un desplazamiento hacia la izquierda de la LAML o empobrecimiento de $\delta^{18}\text{O}$

5.3 Interpretación de los datos de flujo de CO_2 -DDS

En los sistemas geotermales de Juncalito y Colpitas se reconocen concentraciones de CO_2 -DDS mayores a la estándar atmosférica. Aunque la magnitud de estas anomalías difiere para cada zona, estas pueden tener como origen una fuente profunda o una fuente somera. Ambas pueden coexistir en un sistema geotermal y pueden tener el mismo orden de magnitud de concentraciones (Chiodini et al, 2008), por lo que en ciertas ocasiones no se puede discriminar el origen de manera simple. Además del origen del CO_2 , se considera que los procesos físico-químicos internos y externos al sistema hidrotermal, junto a condiciones geológicas que pueden afectar el flujo de gas a lo largo de su ascenso pueden ser fundamentales para ocultar una signatura hidrotermal. Por ejemplo, disolución de CO_2 en acuífero(s) somero(s), bloqueo del ascenso por impermeabilidad de la roca caja o influencia de parámetros ambientales capaces de generar variaciones diurnas o estacionales de las concentraciones del CO_2 -DDS.

5.3.1 Juncalito

Los valores de concentraciones máximas y flujo de CO_2 -DDS en Juncalito son bastante bajos, no superan los $2,57 [\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}]$. Se encuentran concentrados en torno a $1 [\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}]$ aproximadamente. Esto causa que las diferencias de flujo entre los diferentes puntos sean muy bajas y por ello acarrea varios problemas para su análisis estadístico.

Ante estos bajos resultados, se podría esperar que el error de medición del instrumento adquiriera importancia, debido a que éste es de un 10% (3.2.1). En este caso, las concentraciones máximas medidas, en promedio corresponden a 400 ppm, y por ello, con el error de precisión, se podrían alcanzar registros de hasta 400 ± 40 ppm, muy cercano al valor de los flujos más altos medidos en la zona. Con la metodología de trabajo utilizada, se supone que el error no debiera afectar, ya que se miden concentraciones de CO_2 atmosférico al comienzo y al final del registro de CO_2 -DDS, lo que verifica la correcta medición de

concentraciones. Esto obliga a buscar la explicación de las diferencias en los valores de flujo en factores geológicos/ambientales.

Otra implicancia de los bajos valores de concentraciones máximas de CO₂-DDS fue que en muchos casos no se generó un gradiente de concentraciones positivo y constante, lo cual resultó en flujos menores o iguales a 0. De hecho, las concentraciones máximas más bajas (<406 ppm) agrupan la mayor parte de estos casos. Razón para indicar que puede existir una posible relación entre ellos. Este fenómeno se aprecia en la figura 5.2a, en ella se ilustra a los flujos positivos y negativos, en función de las concentraciones máximas medidas. En la figura 5.2b, se muestra un histograma de cantidad de datos que tienen flujo positivo y negativo, con concentraciones bajo 406 ppm. De éste se extrae que existen cerca de 400 mediciones que no tienen flujo positivo, mientras hay sólo unas 250 que si lo tienen. Por lo tanto, se muestra que si las concentraciones no aumentan en más de 15 ppm aproximadamente sobre el nivel base, es muy posible esperar flujos nulos en la zona.

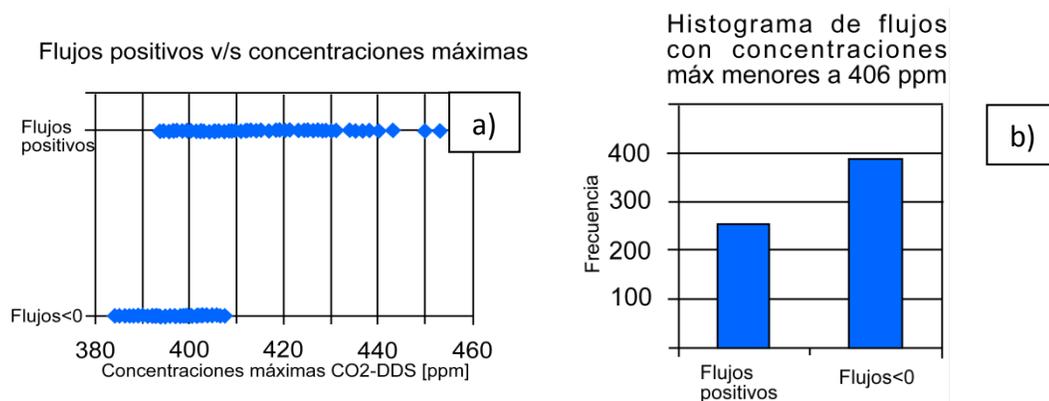


Figura 5.2. a) Gráfico de concentraciones positivas de CO₂-DDS versus flujo positivo y no calculable o menor o igual a 0. b) Histograma de cantidad de datos que tienen flujo positivo y negativo, con concentraciones máximas de CO₂ bajo los 406 ppm.

5.3.1.1 Origen

5.3.1.1.1 Método GSA

Desde los resultados del análisis estadístico realizado, se puede mencionar que los datos de flujo muestran una distribución cercana a log-normal, en torno a 0,88 [g m⁻² d⁻¹], como se ve en el histograma de flujo (fig. 4.42). Esto se traduce en que los datos de probabilidad acumulada del flujo en escala logarítmica siguen casi una recta, sin cambios de curvatura (fig. 4.43). Por lo cual, la interpretación asociada es que en esta zona existe sólo una población de datos, es decir, solo una fuente de CO₂-DDS. De acuerdo a los registros que se tienen de CO₂-DDS en distintos ecosistemas del mundo, la producción biogénica de CO₂-DDS puede tener un rango entre 0,1-21 [g m⁻² d⁻¹] (extraído de Chiodini et al., 2008). Por lo cual, los flujos encontrados en Juncalito podrían ser explicados a partir de actividad biogénica. Sin embargo, el clima desértico en el cual se encuentra este campo geotermal restringe esta hipótesis. Debido a que prácticamente no hay vegetación en superficie más que unos pequeños arbustos a nivel de suelo, sobre los cuales no se realizaron mediciones. Es por esto que las opciones para el origen de CO₂-DDS se reducen a: biogénico, aportado por microorganismos; aporte de la hidrología de la zona, por exsolución de CO₂ desde aguas subterráneas o aguas de infiltración; o aportados por una fuente hidrotermal profunda, con

procesos o condiciones geológicas que disminuyen mucho el flujo a lo largo de su ascenso a superficie. Para comprobar cualquiera de estas 3 hipótesis se necesita mayor información.

Otra interpretación que se desprende de lo anterior, es que al existir sólo una fuente de origen para el CO₂-DDS, no se tiene una concentración anómala en la zona, sino que todo correspondería a flujos de nivel base.

5.3.1.1.2 Isotopo $\delta^{13}\text{C-CO}_2$

Los datos del $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ sugieren que el origen del CO₂ (g) para ZRJ, corresponde a exsolución de gases volcánicos, o geotermal, ya que las muestras tienen signatura de -4,5 y -8,6 (Tabla 4.12-13). Como se vio antes, el origen de las aguas de ZRN y ZRJ es diferente, así es que no se puede extrapolar esta información a ZRN.

5.3.1.2 Procesos, condiciones y factores que modifican concentraciones de CO₂ durante su ascenso

A continuación se analiza cómo una fuente profunda puede ser encubierta por procesos y condiciones geológicas, como se mencionó anteriormente.

El proceso interno que más fácilmente puede encubrir una alta señal de flujo de CO₂-DDS es el de disolución de este gas en acuíferos someros. Como se explicó en 5.1.2.1, en ese caso, se podrían esperar concentraciones importantes de bicarbonato en el agua. Pero las aguas de ZRN tienen muy bajas concentraciones de éste anión (4.3.1). El hecho de que aguas bicarbonatadas no afloren en las cercanías no implica que la disolución no exista, ya que puede ocurrir de todas formas, sin expresión superficial o con surgencia en algún otro sector (se descartan las aguas del sector de Río Juncalito, debido a que presentan un origen distinto). Por lo tanto, no hay claridad al respecto.

Otro punto a considerar que pudiera encubrir una señal de desgasificación desde una fuente profunda es que las condiciones geológicas sean muy poco favorables para la existencia de conductos de ascenso preferenciales para fluidos, tanto líquido como gaseoso. Esto puede indicar muy baja permeabilidad litológica y estructural en la zona, como se analizará más adelante.

Dentro de los procesos externos (ambientales), se intentó identificar alguna relación entre las pequeñas variaciones en los flujos de CO₂-DDS medidos a lo largo del día y las variaciones de los parámetros ambientales. Esto se realizó mediante dos procedimientos, como se mostró en 4.1.1.3.1, sin que ninguno de los dos arrojara una relación clara. De hecho, se observó que tanto las correlaciones lineales no normalizadas, como el modelo inverso no muestran relaciones de influencia de los parámetros ambientales sobre las variaciones de CO₂-DDS. En este caso, la explicación puede ser que no exista tal relación; que exista con otros parámetros ambientales no medidos; que no sea una relación lineal; o que el rango de medición fue muy acotado (en los estudios, este tipo de correlaciones se efectúan en general a través de series de tiempo). Se reconoció que el mayor problema para la interpretación, fue lo restringido de los datos con los que se cuenta para este estudio, en cuanto a magnitud de valores y a extensión en tiempo. Este puede ser un factor fundamental al momento de realizar un buen trabajo de interpretación estadístico.

Si bien las variaciones en el flujo diurno no pudieron ser explicadas por medio de correlaciones con las variaciones de los parámetros ambientales, pueden ser interpretadas como consecuencia de procesos que aumentan la permeabilidad del suelo o la emisión desde la fuente. Es importante notar que los mayores valores se concentran cerca del medio día (fig. 4.11) y que la diferencia registrada entre los valores máximos y mínimos de flujo de CO₂-DDS osciló entre un 40% y un 70 % aproximadamente. Es por ello que las variaciones diurnas del flujo pueden jugar un rol fundamental para poder explicar la distribución espacial de estos valores. Si se entiende que todo el sector del Llano Los Cuyanos es afectado por variaciones diurnas, entonces los mayores valores de flujo registrados en las 3 campañas de medición, así como el pequeño alineamiento que muestran en algunas grillas pueden corresponder a este efecto y no necesariamente a anomalías en la zona. Para ilustrar esta hipótesis, se graficaron todos los valores de flujos registrados en los puntos de interés de cada grilla, incluyendo re-mediciones en otra fecha, versus la hora del día (fig. 5.3). En éste gráfico, se observa que los mayores valores medidos en las grillas, se concentran en la mañana, y al menos se puede inferir que las condiciones de permeabilidad o de fuente de origen son favorecidas en este horario. Según Granieri et al. (2003), las variaciones de corto plazo responden a variaciones externas (ambientales) al sistema mientras que variaciones de largo plazo son provocadas por variaciones internas del sistema. Esto no aporta información acerca de la fuente, sino que puede indicar que la distribución de los flujos está condicionada por procesos ambientales, que se dan desde la mañana hasta el medio día, y no responde a geometrías ni a puntos preferenciales de desgasificación en el Llano Los Cuyanos.

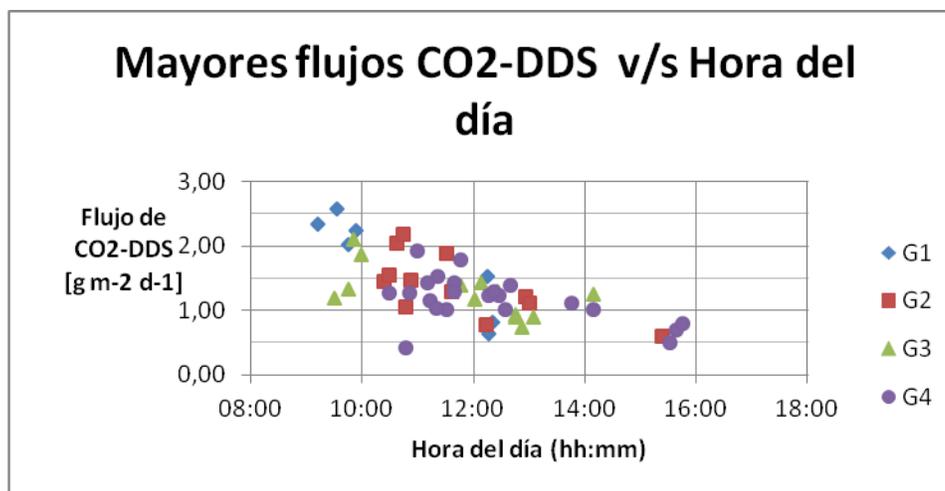


Figura 5.3. Relación entre los mayores valores de flujos de CO₂-DDS medidos en las grillas y su hora de medida. Datos de la 1^o y 2^o campaña.

5.3.2 Colpitas

Los datos de flujo de CO₂-DDS registrados en Colpitas tienen un rango muy amplio, que va desde 0 hasta 26903 [g m⁻² d⁻¹], razón por la cual se ocupa escala log-normal para tratar los datos. La cantidad de registros en donde el flujo de CO₂-DDS fue negativo fue muy baja.

5.3.2.1 Origen CO₂-DDS

5.3.2.1.1 Método GSA

Desde los resultados del análisis estadístico realizado, se puede mencionar que los datos de flujo tienen una distribución polimodal cercana a log-normal para los valores más altos de flujo de CO₂-DDS (fig. 4.44), en torno a 300-400 [g m⁻² d⁻¹] y a los 1400 [g m⁻² d⁻¹]. Sin embargo, la distribución de los valores de entre 10 y 100 [g m⁻² d⁻¹] es algo caótica y para el rango menor a 10 [g m⁻² d⁻¹] es poco clara. En el gráfico de probabilidades acumuladas, se reconoce al menos un punto de inflexión alrededor de 20 [g m⁻² d⁻¹]. A partir de esto se puede decir que al menos existen 2 poblaciones o fuentes de CO₂. Dados los rangos de flujos de CO₂ biogénico, 0,1-21 [g m⁻² d⁻¹], en ecosistemas según la bibliografía (Chiodini et al., 2008 y referencias en el citadas). Se puede inferir que los valores de flujo mayores a 20 [g m⁻² d⁻¹] pueden tener un de origen hidrotermal, básicamente porque una fuente somera/biogénica no es capaz de generar tan altos flujos. Mientras que el resto (<20) pueden ser de origen somero o de una mezcla hidrotermal-somero. En el Bofedal de Colpitas, existe vegetación superficial, a ras de suelo y también presenta actividad orgánica a lo largo de este, que puede generar estos bajos flujos.

A partir de estos datos, no es posible concluir acerca del origen del CO₂, puesto que las distribuciones no son claras para los datos de flujo menor a 100, de hecho pueden ser superposición de poblaciones, distorsionando la curva de probabilidades acumuladas, con uno o más puntos de inflexión. Para evitar este conflicto, Chiodini (2008), genera una metodología donde mide la signatura isotópica de δ¹³C en los puntos donde registra flujo de CO₂-DDS. En este caso, solo se puede comparar la signatura para las muestras de gases libres de manantiales termales, como se realiza más adelante.

Por otro lado, los datos de la grilla de nivel base, con flujos de hasta 5 [g m⁻² d⁻¹] pueden ser representativos de CO₂ de origen netamente biogénico, debido a que se midieron en una zona de humedal con vegetación a ras de suelo y actividad orgánica similar a la del Bofedal de Colpitas. Esto podría implicar que los flujos entre 5 y 20 [g m⁻² d⁻¹] podrían corresponder a una mezcla entre gases de origen profundo y biogénico; aunque también es posible que la actividad biogénica sea mayor en el área de bofedal, aumentando los flujos de CO₂.

5.3.2.1.2 Isotopo δ¹³C-CO₂

Los datos del δ¹³C-CO₂ para la zona del Bofedal de Colpitas se encuentran en el límite entre el campo de exsolución de gases volcánicos y el de respiración de plantas o degradación de materia orgánica. Los datos son -9,2 y -11,2 (Tabla 4.12-14) para el BN y BS respectivamente. Estos indican que los gases libres del BN están más cerca de ser atribuibles a desgasificación magmática. Pero por otro lado, se puede interpretar que la interacción de gases hidrotermales con gases producto de actividad orgánica dentro del bofedal, puede generar una modificación de la señal isotópica.

5.3.2.2 Procesos, condiciones y factores que modifican concentraciones de CO₂ durante su ascenso

De acuerdo a los resultados, se obtiene que existe al menos una fuente profunda y otra somera de CO₂-DDS. Con respecto a la fuente profunda-hidrotermal se puede inferir que se manifiesta a través de los gases libres exsultos en los manantiales, tanto de BN como de

BS4. Como ya se mencionó, las posibilidades que tiene este flujo profundo son mediante ascenso directo o disolución de CO₂ en acuífero(s). En la zona, dados los gases libres, se sabe que parte del flujo sufre el proceso de disolución y posterior exsolución, sea por ascenso y disminución de presión o por ebullición. Además, este proceso puede generar aguas bicarbonatadas por interacción agua/roca, las cuales son encontradas en la zona, como se discutirá más adelante. Por lo tanto, el flujo de CO₂-DDS puede verse disminuido en su ascenso a superficie por efecto disolución.

Los valores más altos de flujo de CO₂-DDS en la zona BS3 y BS4 están asociados a estructuras circulares o pequeños sectores de suelo alterado, descritas antes en 4.2.1. Su morfología es similar a paleopozas (pozas termales antiguas, no activas para surgencia de fase líquida actualmente) (fig 4.18) o simplemente zonas de alteración en el suelo (fig 4.36). En el caso de las paleopozas, esto se infiere por su forma circular, con óxidos pardo rojizos en la capa exterior, sales precipitadas zonadas al centro, a veces con un conducto levemente definido, con alteración del suelo subyacente. A su vez, el suelo alterado está conformado sólo por una cubierta con sales blanquecinas, su génesis podría radicar en la precipitación a partir de fluidos en pequeñas depresiones del suelo, o por precipitación directa en superficie o interfaz suelo-atmósfera, desde el fluido hidrotermal que porta el CO₂. Esta última opción tiene más sentido, debido a que se registraron valores anómalos puntuales de flujo en esos sitios, no se tienen óxidos pardos-rojizos en los bordes, ni alteración del suelo subyacente a esa expresión superficial. En ambos sectores tienen una distribución alineada, como se mostró en 4.1.2.2, con una atenuación espacial de la señal de CO₂-DDS muy abrupta en dirección perpendicular a su lineamiento y con una atenuación más suave de la señal paralelo a esta dirección. Dado lo alto de los valores de flujo, estos datos representan una gran permeabilidad puntual, actuando como conductos alineados preferencialmente. De esta forma se infiere que existen estructuras de desgasificación en el sector BS3 y BS4, en dirección NNW-SSE y NS para BS3, y WNW-ESE para BS4, y que el flujo en esas zonas no es representativo de flujo difuso, en sentido estricto, sino que está controlado por estructuras. En BS4, se reconoce que esta posible estructura sería capaz de permitir el ascenso de aguas; mientras que en el sector BS3, solo se tiene ascenso de gases como el CO₂ y el H₂S, este último reconocido por su olor característico. Una interpretación válida para este hecho es que en BS4 puede darse mayor permeabilidad en comparación con el sector de BS3. Otra explicación, podría ser que el flujo profundo de CO₂ asciende directamente sin interferencia de un acuífero somero en el sector BS3.

En el BN, los valores anómalos se registraron muy cerca de las manantiales termales, que presentaban gases libres, por lo tanto, se infiere que estos flujos tampoco corresponden a flujos difusos, sino que a un flujo de fluidos (aguas y gases) ascendiendo a lo largo de estructuras permeables.

Otros valores anómalos encontrados en BS están asociados a la presencia de ignimbrita alterada a arcillas, como los sectores encontrados en BS1 y BS2. En el primero, esto se reconoce en calicatas; mientras que en el segundo, la ignimbrita aflora a través de una quebrada. Estos datos (BS1 y BS2) en su conjunto presentan una orientación NNW-SSE. Sin embargo, en las calicatas es posible esperar un mayor flujo de CO₂-DDS, debido a que se mide a mayor profundidad, evitando la influencia de depósitos superficiales menos permeables, y en una litología alterada, mucho más permeable. Por lo tanto, el hecho de que las calicatas estuvieran distribuidas con una orientación NS a NNW-SSE puede indicar una falsa orientación de una estructura de desgasificación. También por esta razón fueron excluidas del análisis estadístico.

Al integrar todos los valores anómalos (sin incluir calicatas), sobre 20 [g m⁻² d⁻¹], en un mapa de flujos (fig. 5.3), se observa que existe un lineamiento de mayor jerarquía en dirección

NNW-SSE, entre los datos de todo el Bofedal, y menores lineamientos, en el sector de manantiales de BS4, en quebradas de BS2 y al SW de BS3. El lineamiento mayor incluye entonces a los valores de BN, los parches de ignimbrita alterada en BS1 y de BS2, y por último, las paleopozas y suelos alterados de BS3.

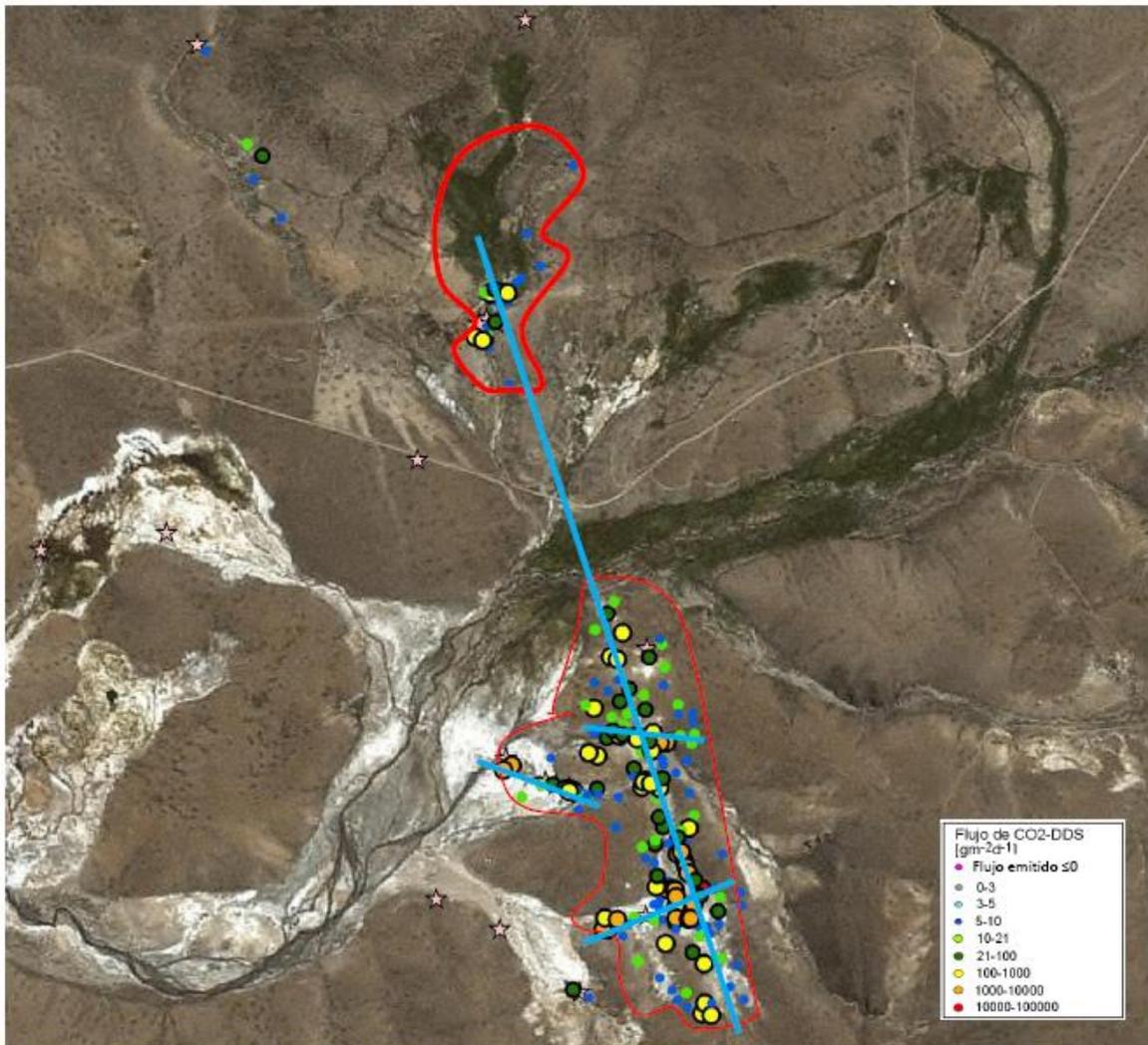


Figura 5.3. Mapa de flujos anómalos de CO₂-DDS en Bofedal de Colpitas. En polígono rojo se destaca toda el área de mediciones de CO₂-DDS y con líneas se destaca orientación de estructuras inferidas a través de flujos anómalos.

A modo de resumen, se evidencia que los altos valores de flujo de CO₂-DDS en el área de Colpitas pueden ser el resultado de condiciones geológicas que son favorables para que exista una desgasificación desde una fuente profunda, en cuanto a la fuente y a la permeabilidad necesaria, señalando que los valores anómalos se concentran en torno a lo que parece ser una estructura lineal de orientación NNW-SSE, con posibles ramificaciones (fig. 5.3).

Con respecto a los efectos ambientales, se puede decir que no afectan en medida considerable al flujo de CO₂-DDS, ya que las repeticiones de registros de flujos no mostraron gran variación. Por lo cual no serían un factor influyente sobre los altos valores de flujo, probablemente de origen hidrotermal. Esto se puede explicar porque flujos profundos de CO₂ no pueden alcanzar equilibrio dinámico con la atmósfera, y entonces no se verían afectados

por cambios en los parámetros ambientales; a diferencia de lo que puede ocurrir con flujos someros, que sí pueden tener un equilibrio dinámico con la atmósfera y por ende, responder con variaciones en los flujos ante cambios significativos de las condiciones ambientales.

5.4 Correlación datos de flujo de CO₂-DDS con geología y geoquímica de aguas termales

A continuación se destacan los principales rasgos geológicos y de la geoquímica de aguas termales que puedan ser relacionados con los datos de flujo de CO₂-DDS. Con toda esta información, se puede construir modelos conceptuales esquemáticos que consideren información acerca de la permeabilidad de la roca y del suelo, de las estructuras presentes, de posibles reservorios y acuíferos someros y de geoquímica de aguas termales en los sistemas geotermales de Juncalito y Colpitas.

5.4.1 Juncalito

A partir del mapa geológico de la zona de Juncalito (Clavero et al., 1998, Clavero et al., 1997), se estudia en particular la geología local de la zona de Llano Los Cuyanos (fig. 5.4), ahí se puede distinguir al basamento y a la cobertura como se describe a continuación. El primero, está constituido por las unidades (de más antigua a más joven): Fm Pantanoso (PTrp), Fm Río Juncalito (OMrj(facies a y b)); Fm Sierra Aliste (Misa (a)). Estas unidades se sobreyacen unas a otras, mediante contactos por discordancia, sea erosiva o angular; excepto Misa(a), que sobreyace a OMrj y a PTrp. Dentro de ellas, se distingue que la unidad Misa(a) y OMrj están plegadas y falladas, presentando Misa una mayor intensidad de deformación en superficie. Por su parte, OMrj tiene depósitos sedimentarios de caliza muy compactada y depósitos volcanoclásticos de compactación media. Dadas estas características, se puede inferir que ambas formaciones pueden tener condiciones de permeabilidad para actuar como reservorio geotérmico en este sistema. La cobertura está conformada por depósitos volcánicos y depósitos no consolidados. Los depósitos volcánicos están compuestos por la unidad Ignimbrita Laguna Verde (Piilv), y sobre ésta, los depósitos volcánicos recientes de los volcanes Los Cuyanos y Juncalito. En conjunto, pueden ser lo suficientemente impermeables para actuar como capa sello.

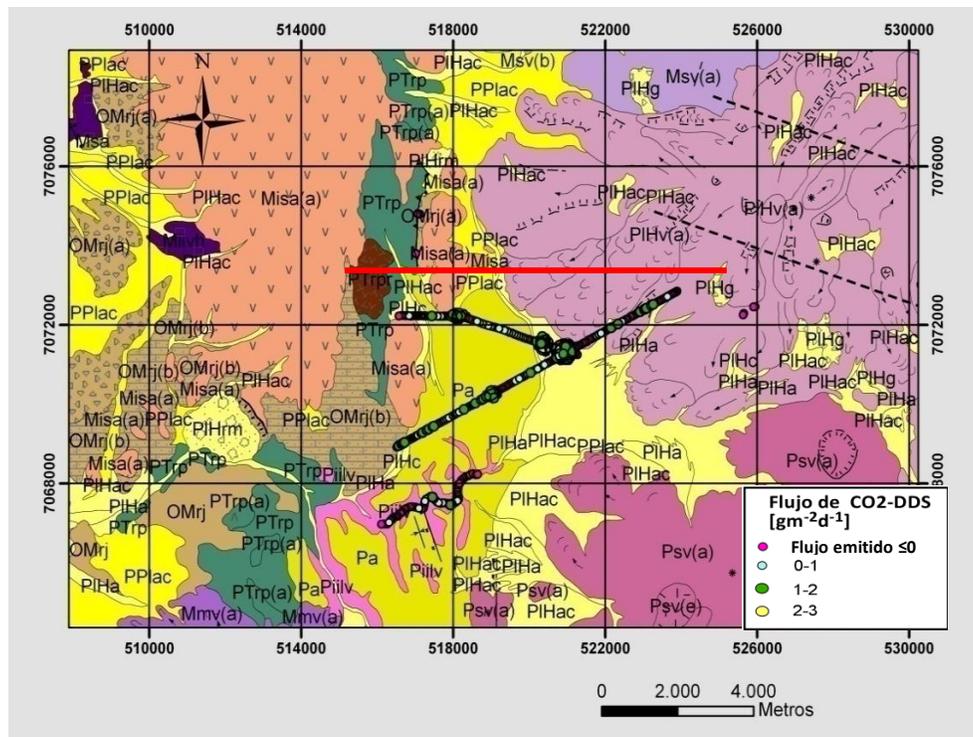


Figura 5.4. Flujos de CO₂-DDS sobre geología de Llano Los Cuyanos, extraída de compilación de mapas geológicos preliminares de las áreas del Salar de Piedra Parada y del Salar de Wheelwright, escala 1:100000 (Clavero et al., 1998, Clavero et al., 1997). Línea roja ilustra perfil en donde se construyó modelo conceptual esquemático (fig. 5.5).

Dado lo bajo y uniforme de los flujos de CO₂-DDS, no se reconoció alguna estructura de desgasificación presente en la zona; aunque es posible que sí exista, generando dos posibilidades: que no haya sido identificada, o que no exista fuente de desgasificación. Este último escenario puede ser factible, dada la evidencia en terreno: ausencia de manifestaciones termales gaseosas, como fumarolas o como manantiales termales con gases libres. En ese caso, los flujos medidos en terreno serían generados por una fuente somera, pero de origen desconocido.

En el escenario de un flujo profundo de CO₂ encubierto puede darse, tanto disolución de éste en acuíferos, sin una consecuente descarga de aguas con altos contenidos de bicarbonato en superficie, como también puede ocurrir que no existan estructuras importantes en el sector que faciliten el ascenso de los fluidos. Esto, sumado a la impermeabilidad de la cobertura volcánica, asociada a la posible capa sello de la Ignimbrita Laguna verde, pueden ocasionar que no exista una señal de CO₂-DDS en superficie. Ambos factores pueden estar presentes simultáneamente en la zona, disminuyendo mucho las concentraciones de CO₂-DDS. Como comentario final en este sentido, se indica que en la estratigrafía de la zona existe la unidad OMrj (b), compuesta de carbonatos. Si existiese un flujo de CO₂ en ese sector en presencia de agua, se formaría el doble de bicarbonato que si solo se disolviera CO₂(g) en agua como se explicó en 5.1.2.1. Esto puede implicar que si existiese un ascenso vertical de fluidos hidrotermales exsueltos desde un cuerpo magmático en la zona, muy probablemente estos desarrollarían el proceso de disolución explicado y tendrían una alta concentración de bicarbonato. Como esto no ocurre en la zona de MT-RN, se puede interpretar que bajo ese escenario, esas aguas no tendrían descarga superficial o bien no existiría flujo profundo. De esta forma, esto implicaría que las aguas termales de RN no son generadas por flujos verticales, sino que podrían aflorar como resultado de flujos laterales distales, ya que en los

volcanes más cercanos no se tiene actividad actual de flujos de tipo vertical, de acuerdo al razonamiento de los modelos clásicos (Giggenbach, 1997). Otra posibilidad para explicar las aguas de RN, sería infiltración profunda de aguas meteóricas, pero en ese caso, falta información más acabada acerca de la geología estructural de la zona.

Por lo tanto, con todos estos antecedentes se reconoce que la respuesta al origen y comportamiento del CO₂ en Juncalito queda con bastantes incertidumbres, con varios escenarios en parte factibles, pero la información disponible no es suficiente para inclinarse por una o por otra opción.

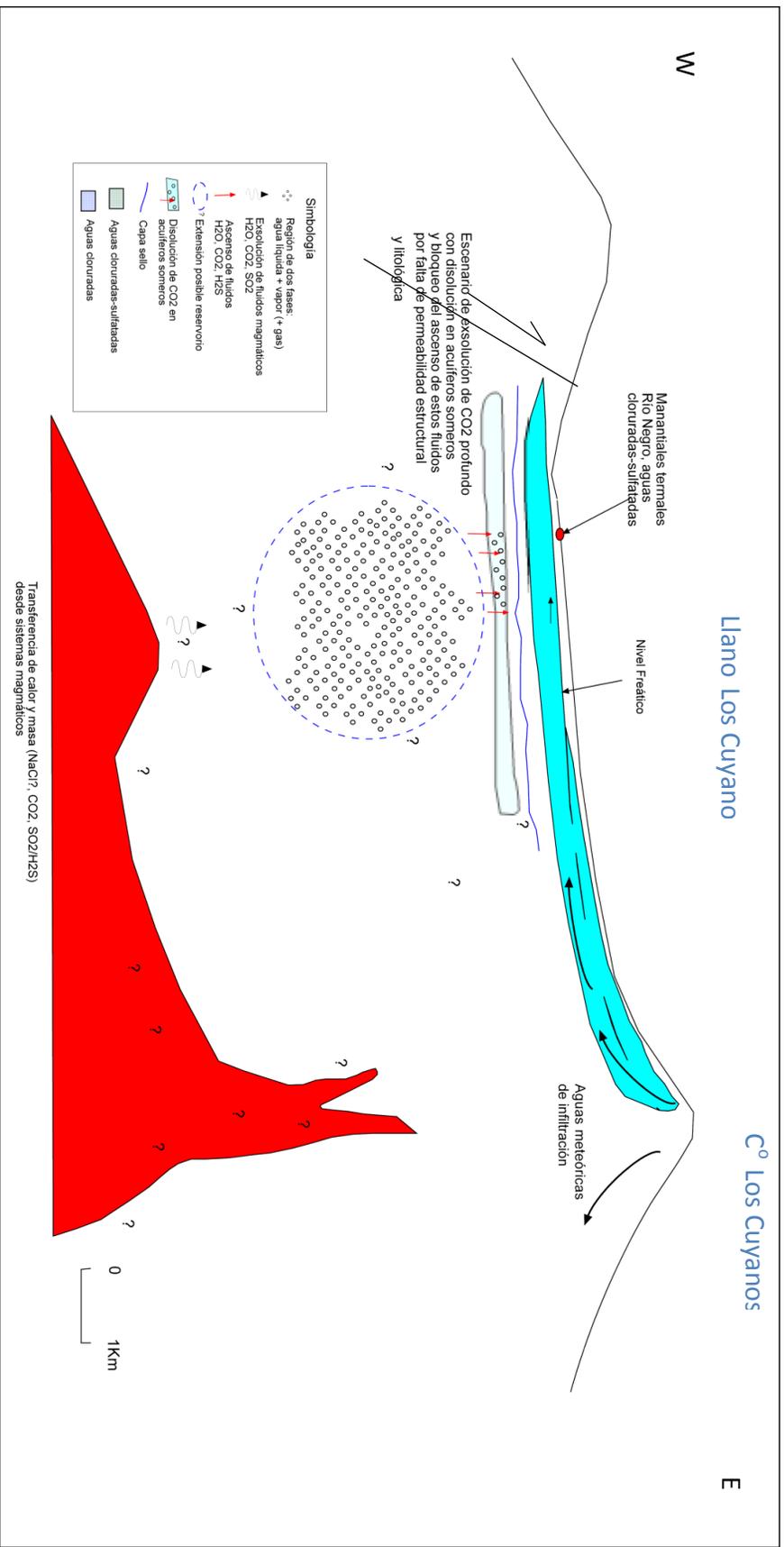


Figura 5.5. Modelo conceptual esquemático del sistema geotermal de Juncaquito: escenario de sistema "ciego". Basado sobre los datos de mediciones de CO₂, geología y geoquímica de aguas. Dinámica de fluidos extraída de Henley, 1983 y Giggenbach, 1997.

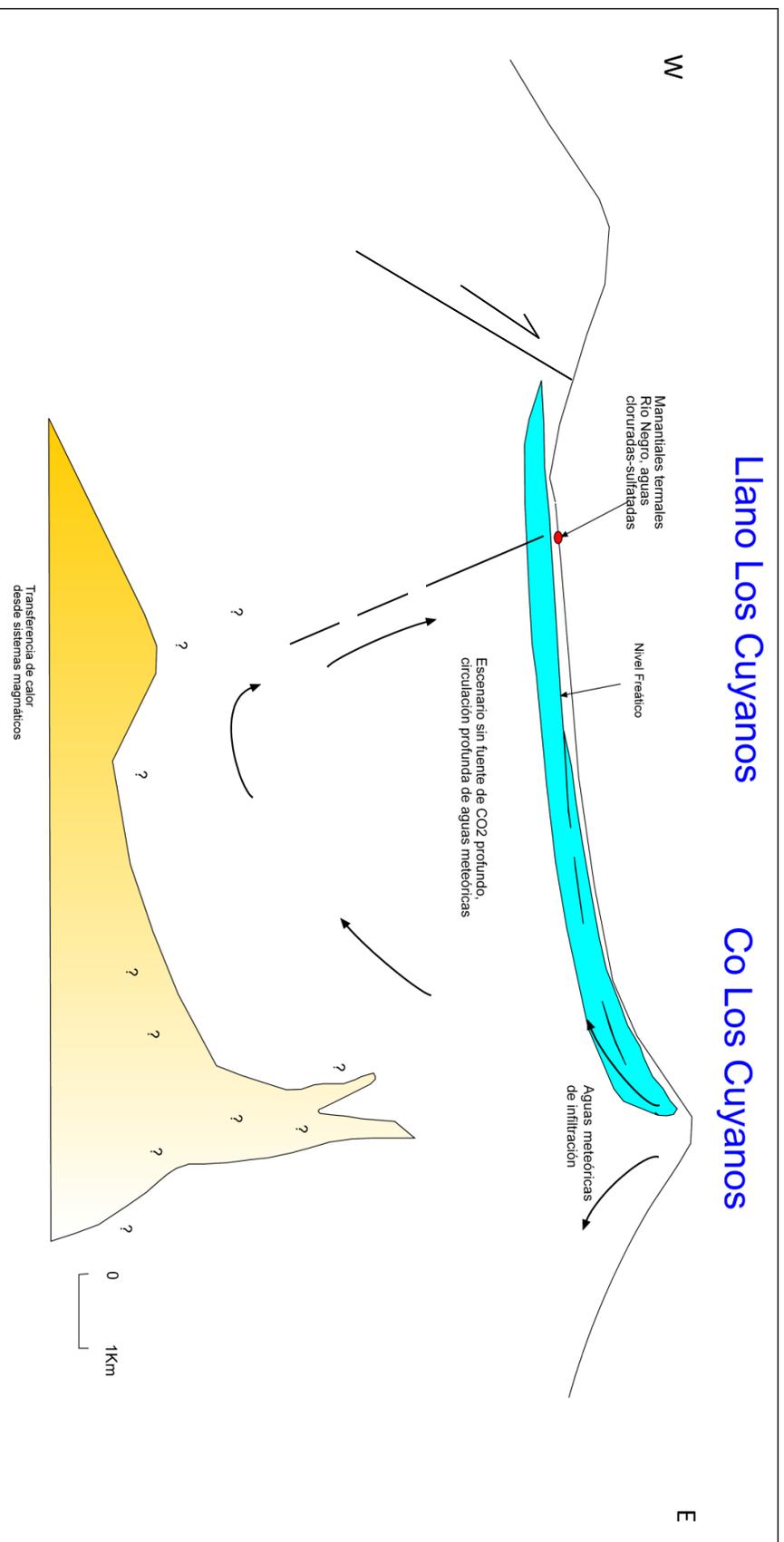


Figura 5.6. Modelo conceptual esquemático del sistema geotermal de Juncalito: escenario de sistema de infiltración profunda. Basado sobre los datos de mediciones de CO₂, geología y geoquímica de aguas. Dinámica de fluidos extraída de Henley, 1983 y Gigenbach, 1997.

5.4.2 Colpitas

En la zona de Colpitas se identifica que la Fm. Lupica (OMI) actúa como basamento de la cobertura volcánica y sedimentaria. Esta formación, podría actuar como reservorio geotérmico en la zona, debido a que presenta gran plegamiento y fallamiento. Esta característica es muy importante, ya que puede aumentar de uno a dos órdenes de magnitud la permeabilidad secundaria de un depósito (González de Vallejo, 2002).

La cobertura, principalmente volcánica, puede funcionar como capa sello debido al carácter relativamente impermeable y aparentemente poco deformado de los depósitos volcánicos. Además, encubre posibles estructuras del basamento y en sus depósitos no muestra con claridad evidencias estructurales en terreno. Es por esto que sólo se cuenta con estructuras o lineamientos inferidos de acuerdo a la geomorfología o a patrones regionales. La dirección que más se repite a escala local y regional es NNW-SSE o NS.

Con respecto a la fuente de calor y fluidos, sólo se infiere su existencia por la interpretación de desgasificación magmática y por las edades recientes de las rocas volcánicas. Probablemente análisis de geofísica puedan aportar información con respecto a profundidades de emplazamiento de un cuerpo magmático que pueda alimentar al sistema hidrotermal.

De acuerdo a la información proporcionada por el CO₂-DDS, se puede hablar de la existencia de al menos dos fuentes de CO₂-DDS. La primera, de desgasificación profunda, desde un cuerpo magmático o un reservorio geotermal, dados los altos flujos registrados. La segunda, somera, que probablemente corresponde a fuente biogénica, dada la actividad orgánica que se observa en el bofedal, además coincide con el rango de flujos registrado en la literatura y por último, por los datos de isótopos. Estos últimos están en un rango límite entre desgasificación volcánica y fuente biológica. Esto puede indicar que fluidos hidrotermales, provenientes de desgasificación volcánica ascienden hasta los manantiales, en donde interactúan con los productos de desgasificación orgánica. Este fenómeno es muy probable dado que los manantiales se desarrollan en el sector del bofedal.

Con respecto a la fuente de desgasificación profunda, se interpreta que corresponde a desgasificación volcánica, cuyo flujo puede disolverse en un reservorio geotermal, para luego volver a exsolverse, seguir su ascenso, y llegando hasta la superficie como gas difuso a través del suelo o disolverse en acuíferos someros. Probablemente, el CO₂(g) se exsuelve desde un reservorio por procesos de ascenso y disminución de presión a través de estructuras preferenciales, así como también por procesos de ebullición. A menores condiciones de presión el CO₂ es mucho más reactivo para interactuar con la roca caja (Giggenbach et al., 1997), por lo que se entiende que el proceso de disolución en aguas y formación de HCO₃, es mucho más eficiente en acuíferos someros. En este proceso de disolución, se consume parte del flujo de CO₂ profundo, generando altas concentraciones de bicarbonato cuando se tienen tiempos suficientes de interacción agua roca, como se reconoce en la zona. Sin embargo, de todas formas es capaz de generar altos flujos de CO₂-DDS orientados preferencialmente en dirección NNW-SSE. Cabe señalar entonces, que las aguas bicarbonatadas se interpretaron como producto de la disolución de CO₂ y no como disolución de carbonatos, ya que no se han identificado formaciones geológicas en la zona con gran presencia de carbonatos.

Como se mencionó antes, los flujos de CO₂ en el sector del Bofedal aparentemente están controlados por estructuras de desgasificación, cuya orientación es NNW-SSE. Esta dirección coincide con la de la estructura inferida en ese sector en el mapa geológico, tal como

se muestra en la siguiente figura, donde se sobreponen los datos de flujo anómalos sobre las unidades geológicas y los lineamientos inferidos (fig. 5.6).

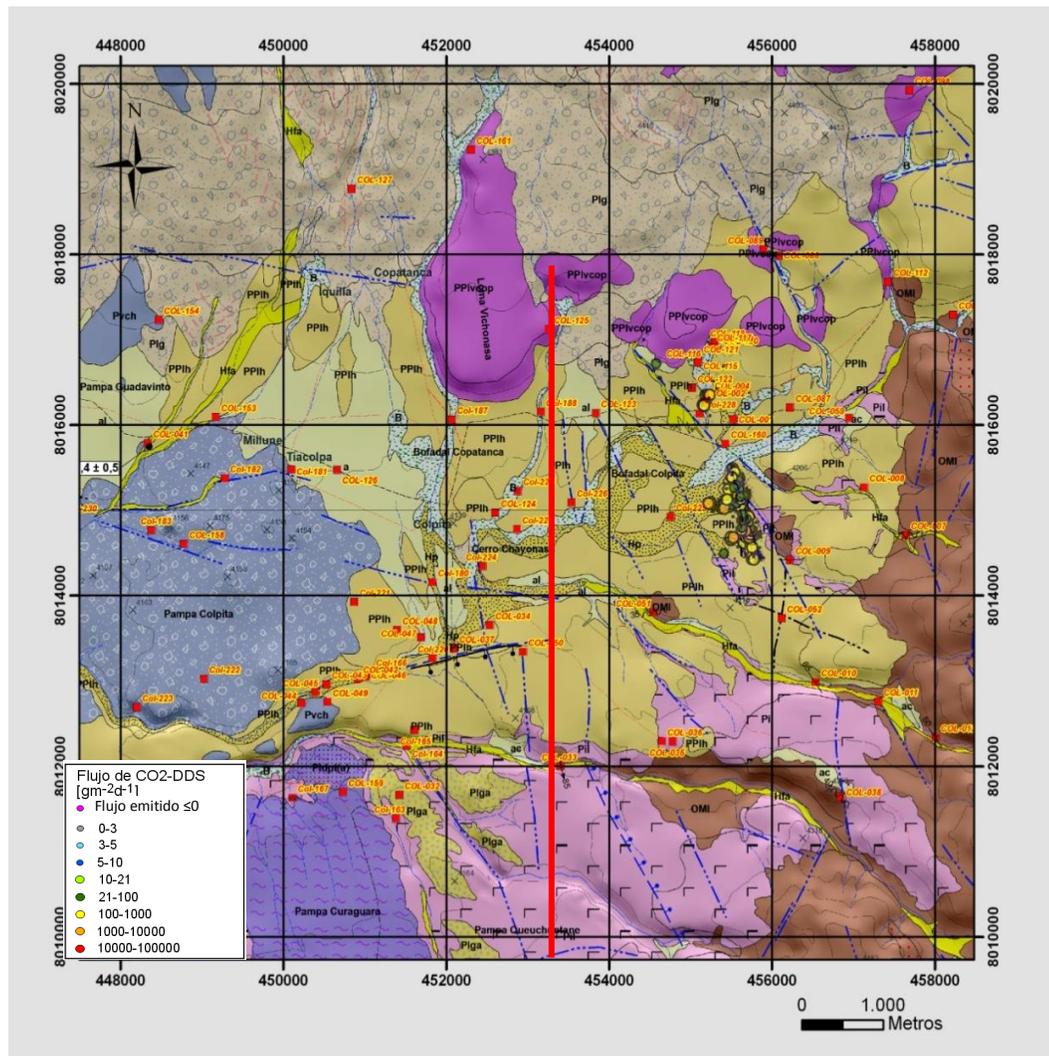


Figura 5.7. Flujos de CO_2 -DDS sobre la geología local del Bofedal de Colpitas, extraída y modificada de mapa geológico realizado por AURUM para EASA, escala 1:100000, 2011. En línea roja se ilustra perfil en donde se construyó modelo conceptual de Colpitas (fig 5.8).

Por último, la evidencia superficial de alteración sulfato ácida, tipo “steam heated”, sumada a las emanaciones actuales de H_2S , respalda la hipótesis de que Colpitas corresponde a un sistema hidrotermal activo, que presenta aportes de gases magmáticos, posiblemente desarrollando un reservorio geotérmico, el cual presenta descargas de fluidos hidrotermales a través de estructuras preferenciales (en la zona del Bofedal), de orientación NNW-SSE y posibles ramificaciones de ésta.

Para ilustrar todas las características descritas con respecto al sistema hidrotermal de Colpitas, se construye el modelo conceptual (fig. 5.7). Éste tiene como base el levantamiento geológico regional realizado por AURUM-EASA, 2011. En él se grafican: origen de fluidos hidrotermales; procesos y condiciones geológicas que sufriría el CO_2 al ascender desde una

fuelle profunda; y evidencias superficiales que avalan el modelo. Aunque debe quedar en claro que es esquemático, en cuanto a profundidades de emplazamiento de cuerpos magmáticos y dimensiones de un posible reservorio geotermal.

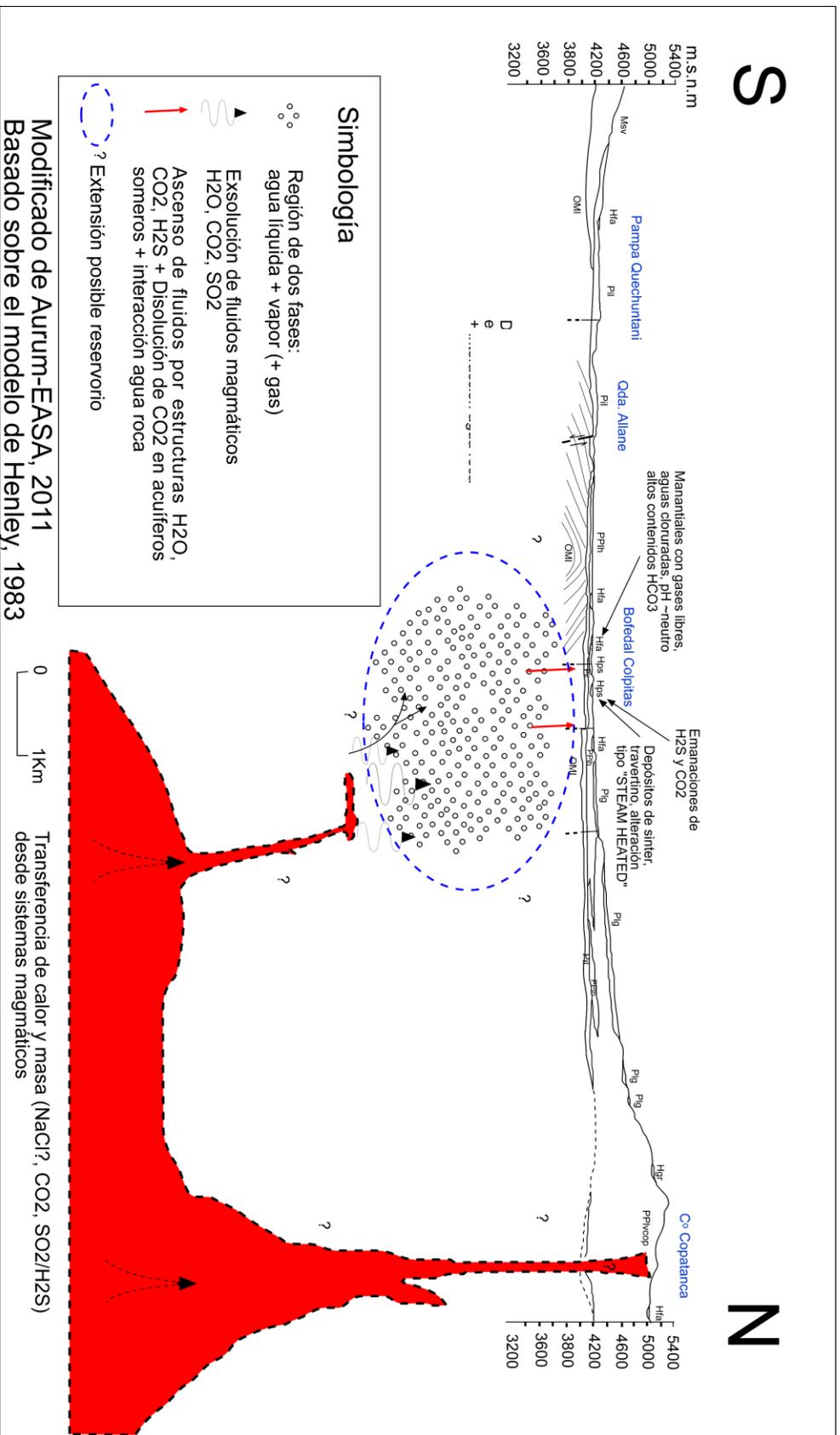


Figura 5.8. Modelo conceptual esquemático del sistema geotermal del Colpitas. Modificado desde AURUM-EASA, 2011. Basado sobre los datos de mediciones de CO₂, geología y geoquímica de aguas.

Capítulo 6. Conclusiones

El método de medición de CO₂-DDS es aplicable para exploración de campos geotermales en sectores donde se tenga material (roca o sedimento) superficial con una porosidad homogénea. Por lo tanto, es posible medir en suelo orgánico, arenas, gravas, pero no sobre campos de lava fresca. Otra limitación del registro es que se debe medir en condiciones de suelo secas (al menos 2 días), para tener registros confiables. Además, como el método utiliza el dato de flujo que emana desde el suelo, no se recomienda aplicarlo en zonas donde el aumento de concentraciones no sea suficientemente pronunciado como para generar gradientes positivos y definidos, puesto que en ese caso, no es posible calcular flujos positivos que puedan ser analizados estadísticamente. Por lo tanto, se concluye que el método pierde robustez cuando se alcanzan valores tan bajos de concentraciones de CO₂-DDS, como ocurrió en el caso de Juncalito. Respecto a este último punto, se resalta que en otros países donde se ha utilizado el método, se ha asociado un origen biogénico a bajos niveles de flujo, pero se trata de ambientes que cuentan con la presencia de vegetación clara y donde se ha caracterizado los rangos de CO₂-DDS que estos suelos pueden emitir. Sin embargo, en el Norte de Chile ésta misma relación no es directa, ya que el clima árido imperante en la zona impide el desarrollo de macro vegetación dejando abierta la discusión acerca de cuál es la fuente generadora de CO₂, si profunda encubierta o somera dada por microorganismos. Además, cabe mencionar la influencia que puede tener el suelo conformado de gravas, como ocurre con parte de la cobertura sedimentaria reciente en el altiplano Chileno, ya que puede presentar carbonatos en pequeñas cantidades entre los poros, los que en suma pueden atrapar o disolver en conjunto con agua el CO₂ gaseoso en niveles someros, por lo que se sugiere estudios químicos al respecto con el objeto de cuantificar su influencia y de esa forma evaluar la aplicación del método sobre este tipo de depósitos.

En este estudio, para el área de Colpitas, el método es capaz de mostrar altos flujos alineados sugiriendo la presencia de una estructura de desgasificación lineal, que coincide con los lineamientos inferidos según los datos geológicos. Además, sugiere la existencia de una fuente profunda hidrotermal de desgasificación por medio del análisis estadístico de los datos de flujo y por su correlación con datos de $\delta^{13}\text{C}$. También se reconoce una buena correlación entre la presencia de altos flujos de CO₂-DDS y la presencia de gases libres observados en manantiales termales, emanaciones de H₂S desde el suelo, aguas con altos contenidos de bicarbonato y estructuras de tipo paleopozas o suelos alterados, lo cual indica que el flujo de CO₂-DDS está controlado estructuralmente y que probablemente existe un fuerte proceso de condensación en la zona. Esto es coherente con el tipo de alteración sulfato ácida, steam heated o de aguas vapor calentadas, que implica procesos de oxidación y condensación de H₂S y/o CO₂, respectivamente. El ascenso de estos gases de origen hidrotermal calientan acuíferos superficiales, generan las manifestaciones hidrotermales y minerales de alteración encontrados en superficie. Todos estos datos en su conjunto permiten concluir que es muy probable que el sistema geotérmico de Colpitas presente un cuerpo magmático en profundidad que transfiere calor y masa hacia la superficie, otorgándole el carácter de sistema geotermal activo asociado a volcanismo con un aporte de gases que no es despreciable. Para dimensionar el alcance de estas emanaciones se realizó una estimación mínima de flujo de CO₂ liberado desde el suelo a la atmósfera con los datos puntuales, obteniéndose un valor de 76000 [T Km⁻² año⁻¹], comparable con otros campos geotermales del mundo (fig 6.1). Aunque cabe mencionar que muchas de las mediciones fueron realizadas sobre una estructura de gran permeabilidad, por lo cual no se puede considerar como flujo difuso, sino que preferencialmente orientado. Para tener estimaciones más exactas, existen herramientas más complejas de geoestadística, donde destacan los procedimientos de simulación Gaussiana (Cardellini, et al., 2003) e interpolación de flujos tipo Kriging (Cardellini, et al., 2003). Con estas herramientas también se pueden delinear estructuras de desgasificación difusa que no sean

evidentes y comparar la emisión de CO₂ desde distintos campos geotermales. Es por ello que se sugiere realizar este tipo de análisis.

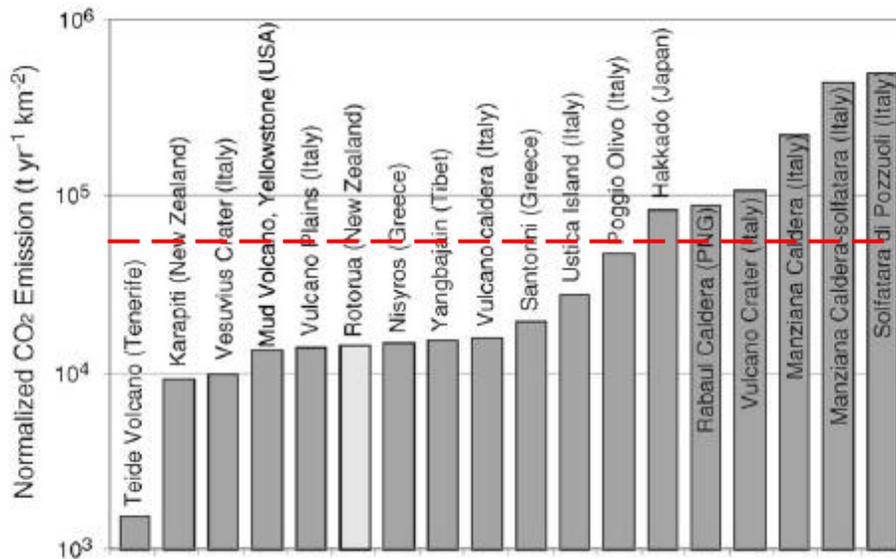


Figura 6.1. Emisiones de CO₂ a la atmósfera de distintos sistemas hidrotermales y volcánicos. Colpitas está demarcado por la línea punteada roja. Diagrama extraído de Werner et al., 2006.

Con respecto a estudios posteriores en la zona, se sugiere como aplicación de interés la de utilizarlo sobre estructuras inferidas; así como también se sugieren mediciones sobre el sector de plegamiento de la Fm Lupica, ya que un anticlinal como el indicado en el perfil puede constituir una “trampa” para los gases y para fluidos hidrotermales en general. En ese sentido, la aplicación sería poder dimensionar de mejor forma la extensión del posible reservorio, pero según el mapa geológico no se encuentran estructuras inferidas que posibiliten el flujo a través de la unidad de ignimbrita Lauca.

En el caso de Juncalito, el método solo es capaz de señalar que existe 1 fuente de origen. No se encuentran flujos anómalos de CO₂-DDS en la zona, lo cual puede ser consistente con la ausencia de ascenso vertical de fluidos hidrotermales o ausencia de estructuras, pero no puede descartar ni lo uno ni lo otro. Se concluye que faltan datos para dilucidar el origen del CO₂. Así es que se sugiere complementar el estudio con datos de isótopos de δ¹³C desde el suelo; o bien datos para distinguir una fuente somera, como podrían ser cultivo de microorganismos del suelo, o medición de perfiles de oxígeno del suelo. Por otro lado, es importante destacar los resultados y el análisis preliminar que se puede hacer de la ZRJ al sur del Llano Los Cuyanos, debido a que los datos de isótopos indican posible desgasificación magmática, y como ya se mencionó, los fluidos de ese sector pueden corresponder a fluidos de otro sistema hidrotermal, distinto del de ZRN. Además, la presencia de gases libres y altos contenidos de bicarbonato en las aguas, sugieren que en ese sector se pueden encontrar anomalías de flujo de CO₂-DDS. Por lo cual, se estima que realizar mediciones de CO₂-DDS en la zona sería de bastante interés si lo que se quiere es seguir

evaluando o calibrando el método o si se quiere distinguir y/o aportar información para comprobar la existencia de alguna estructura.

Por último, señalar que no se pudo determinar si las variaciones diurnas de flujo de CO₂-DDS eran respuesta a cambios atmosféricos. Si se quiere un grado mayor de certeza, se sugiere un estudio más acabado, con mayor cantidad de muestras y en un período de tiempo más prolongado, pero se debe considerar que los resultados pueden ser igualmente difíciles de interpretar debido a lo bajo de los flujos. Por lo tanto, una de las sugerencias finales es no realizar mayores estudios de detalle en zonas con bajas concentraciones de CO₂-DDS, debido a que el método en esos casos es limitado.

Capítulo 7 Referencias

Aguilera, F., 2008. Origen y naturaleza de los fluidos en los sistemas volcánicos, geotermales y termales de baja entalpía de la zona volcánica central (ZVC) entre los 17°43' y 25°10'. Tesis de Doctorado. Universidad Católica del Norte.

C.A.J. Appelo, D. Postma, 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2nd Edition.

Arnórsson, S., 2000. *Isotopic and Chemicals techniques in geothermal exploration, development and use*. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA.

Arnórsson, S., Stefánsson, A., Bjarnason, J., 2007. *Fluid-Fluid Interactions in Geothermal Systems*. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. Vol. 65, pp. 259-312

Baubron, J.C., Rigo, A., Toutain, J.P., 2002. Soil gas profiles as a tool to characterize active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France). *Earth and Planetary Science letters*, Vol 69-81.

Cardellini, C., Chiodini, G., and Frondini, F., 2003: Application of stochastic simulations to CO₂ flux from soil: Mapping and quantifying gas release. *J. Geophys. Res.*, 108, 2425-2437.

Chiodini, G., Caliro, S., Cardellini, C., Avino, R., Granieri, D., Schmidt, 2008: Carbon isotopic composition of soil CO₂ efflux, a powerful method to discriminate different sources feeding soil CO₂ degassing in volcanic-hydrothermal areas. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 274, 372-379.

Chiodini, G., Frondini, F., Cardellini, C., Granieri, D., Marini, L., and Ventura, G., 2001: CO₂ degassing and energy release at Solfatara volcano, Campi Flegrei, Italy. *J. Geophys. Res.*, 106-B8, 16,213-16,221.

Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., and Marini, L., 1998: Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Appl. Geochem.* 13, 543-552.

Chiodini, G., Frondini F., and Ponziani, F., 1995: Deep structures and carbon dioxide degassing at Central Italy. *Geothermics* 24, 81-94.

Clavero, J., Gardeweg, M. y Mpodozis, C., 1997. Mapa Geológico del área del Salar de Wheelright, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, escala 1:100.000, Versión Preliminar.

Clavero, J., Gardeweg, M. y Mpodozis, C., 1998. Mapa Geológico del área del Salar de Piedra Parada, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, escala 1:100.000, Versión Preliminar.

Coplen, T. B., 1994. Reporting of Stable Hydrogen, Carbon, and Oxygen Isotopic Abundances, *Pure and Applied Chemistry*, v. 66, p. 273-276.

Fridriksson, T., 2009. Diffuse CO₂ degassing through soil and geothermal exploration. Presented at "Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources", organized by UNU-GTP and LaGeo, in Ahuachapan and Santa Tecla, El Salvador.

Fridriksson, T., Kristjánsson, B.R., Ármannsson, H., Margrétardóttir, E., Ólafsdóttir, S., and Chiodini, G., 2006: CO₂ emissions and heat flow through soil, fumaroles, and steam

heated mud pools at the Reykjanes geothermal area, SW Iceland. *Applied Geochemistry*, 21, 1551–1569.

García, M., Gardeweg, M., Clavero, J., Hérail, G., 2004. Mapa geológico de la Hoja Arica, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica, N°84, 150 p., 1 mapa escala 1:250000

Gardeweg, M., Mpodozis, C. y Clavero, J., 1997. Mapa Geológico de la Hoja Nevado Ojos del Salado, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, escala 1:100.000, Versión Preliminar.

Giggenbach, W., 1997. The Origin and Evolution of Fluids in Magmatic-Hydrothermal Systems. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Third Edition, Hubert L. Barnes (ed.), John Wiley and Sons Inc. Publication, 737-796.

Giggenbach, W., 1991. Chemical techniques in geothermal exploration; Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development (D'Amore F., Ed.), UNITAR/UNDP Center on Small Energy Resources, Rome, 119-144.

Granieri, D., Chiodini, G., Marzocchi, W., and Avino, R., 2003: Continuous monitoring of CO₂ soil diffuse degassing at Phlegraean Fields (Italy): Influence of environmental and volcanic parameters. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 212, 167-179.

Gupta, H., Sukanta, R., 2007. *Geothermal Energy: an alternative resource for the 21st century*, Elsevier.

Gutierrez, M., 2008. *Geomorfología*. Universidad de Zaragoza. Pearson Educación S.A. Madrid, ISBN:978-84-8322-389-5. 920 páginas. España.

Gutscher, M., 2002. Andean subduction styles and their effect on thermal structure and interplate coupling. *Journal of South American Sciences*. 15 3-10

Henley, R.W., Ellis, A.J., 1983: Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. *Earth Science Reviews*.

Hinkle, M., 1994: Environmental conditions affecting concentrations of He, CO₂, O₂ and N₂ in soil gases. *Applied Geochem.* Vol. 9, pp. 53-63.

Lewicki, J.L., Oldenburg, C.M., 2005. Near-surface CO₂ monitoring and analysis to detect hidden geothermal systems, *Proceedings, Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.

Lewicki, J.L., Oldenburg, C.M., 2004. Strategies for detecting hidden geothermal systems by near-surface gas monitoring, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-56895.

Lewicki, J., L., Brantley, S., L., 2000: CO₂ degassing along the San Andreas fault, Park field, California, *Geophys. Res. Lett.*, 27(1)5-8.

Rye, R., 2005. A review of the stable-isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermal systems. *Chemical Geology*, 5-36.

Scrimgeour, C. M., Rollo, M. M., Mudambo, S. M. K. T., Handley, L. L., and Prosser, S. J., 1993. A Simplified Method for Deuterium/Hydrogen Isotope Ratio Measurements on Water Samples of Biological Origin, *Biological Mass Sp*

Tibaldi, A., Corazzato, A., Roviola, A., 2008. Miocene-Quaternary structural evolution of the Uyuni-Atacama region, Andes of Chile and Bolivia, *Tectonophysics*, 22p.

Toutain, J.P., Baubron, J.C., 1999. Gas geochemistry and seismotectonics: a review. *Tectonophysics* 304, 1-27.

Werner, C., Cardellini, C., 2006. Comparison of carbon dioxide emissions with fluid upflow, chemistry, and geologic structures at the Rotorua geothermal system, New Zealand. *Geothermics*.

Werner, C., Brantley, S.L., Boomer, K., 2000. CO₂ emissions related to the Yellowstone volcanic system 2. Statical sampling, total degassing, and transport mechanisms. *J. Geophys. Res.* 105, 10831-10846.

Anexos

Anexo A: CO2-DDS

A.1. Datos de flujo de CO2-DDS registrados en Juncalito

CODIGO	MAX_CO2 [ppm]	GRADIENTE [ppm s ⁻¹]	E [m]	N[m]	Z[m]	FECHA	HORA	FLUJO [gm ⁻² d ⁻¹]
CO2_JU_P1-003	410	0,11	516567	7068951	3967	09/03/11	10:13	1,2
CO2_JU_P1-004	411	0,08	516594	7068965	3982	09/03/11	10:26	0,8
CO2_JU_P1-005	407	0,09	516622	7068983	3960	09/03/11	10:40	1,0
CO2_JU_P1-006	416	0,14	516649	7068998	3960	09/03/11	10:50	1,5
CO2_JU_P1-007	423	0,14	516673	7069010	3947	09/03/11	11:01	1,5
CO2_JU_P1-008	411	0,12	516698	7069022	3946	09/03/11	11:11	1,3
CO2_JU_P1-009	426	0,11	516725	7069039	3956	09/03/11	11:21	1,2
CO2_JU_P1-016	402	0,06	516907	7069140	4067	09/03/11	17:01	0,6
CO2_JU_P1-017	407	0,08	516939	7069149	4067	09/03/11	16:44	0,9
CO2_JU_P1-018	401	0,06	516967	7069161	4073	09/03/11	16:35	0,6
CO2_JU_P1-019	403	0,06	516994	7069175	4077	09/03/11	16:25	0,7
CO2_JU_P1-020	403	0,06	517018	7069192	4069	09/03/11	16:17	0,7
CO2_JU_P1-021	402	0,04	517043	7069207	4075	09/03/11	16:08	0,5
CO2_JU_P1-022	401	0,06	517073	7069220	4071	09/03/11	15:58	0,6
CO2_JU_P1-025	404	0,08	517152	7069261	4065	09/03/11	15:19	0,9
CO2_JU_P1-026	410	0,11	517182	7069278	4073	09/03/11	15:09	1,2
CO2_JU_P1-027	408	0,10	517200	7069292	4077	09/03/11	15:00	1,0
CO2_JU_P1-028	408	0,08	517231	7069308	4072	09/03/11	14:49	0,9
CO2_JU_P1-030	401	0,07	517283	7069332	4063	09/03/11	13:42	0,7
CO2_JU_P1-031	409	0,10	517309	7069345	4064	09/03/11	13:33	1,1
CO2_JU_P1-032	410	0,12	517363	7069373	4062	09/03/11	13:23	1,3
CO2_JU_P1-033	407	0,09	517337	7069357	4068	09/03/11	13:11	0,9
CO2_JU_P1-034	405	0,08	517387	7069389	4064	09/03/11	13:01	0,8
CO2_JU_P1-036	401	0,06	517440	7069419	4066	09/03/11	12:25	0,6
CO2_JU_P1-037	407	0,10	517468	7069433	4067	09/03/11	12:18	1,1
CO2_JU_P1-038	412	0,11	517496	7069447	4067	09/03/11	12:09	1,1
CO2_JU_P2-005	405	0,06	518254	7072218	4153	10/03/11	10:13	0,7
CO2_JU_P2-006	411	0,08	518225	7072220	4157	10/03/11	10:22	0,8
CO2_JU_P2-007	429	0,12	518193	7072220	4154	10/03/11	10:30	1,3
CO2_JU_P2-008	425	0,12	518166	7072220	4154	10/03/11	10:51	1,3
CO2_JU_P2-009	440	0,18	518133	7072219	4156	10/03/11	11:00	1,9
CO2_JU_P2-010	426	0,14	518105	7072220	4158	10/03/11	11:11	1,4
CO2_JU_P2-011	428	0,15	518075	7072219	4162	10/03/11	11:22	1,5

CO2_JU_P2-012	418	0,10	518046	7072219	4161	10/03/11	11:31	1,0
CO2_JU_P2-013	425	0,14	518015	7072220	4161	10/03/11	11:39	1,4
CO2_JU_P2-014	405	0,06	517985	7072219	4165	10/03/11	11:53	0,6
CO2_JU_P2-015	415	0,10	517953	7072220	4168	10/03/11	12:00	1,1
CO2_JU_P2-016	413	0,08	517922	7072216	4167	10/03/11	12:10	0,8
CO2_JU_P2-017	402	0,06	517896	7072217	4174	10/03/11	12:19	0,6
CO2_JU_P2-018	411	0,08	517865	7072223	4178	10/03/11	12:26	0,9
CO2_JU_P2-019	403	0,06	517835	7072220	4181	10/03/11	12:39	0,6
CO2_JU_P2-020	411	0,08	517804	7072217	4176	10/03/11	12:47	0,8
CO2_JU_P2-021b	408	0,07	517772	7072224	4173	10/03/11	14:24	0,7
CO2_JU_P2-023	406	0,08	517713	7072216	4182	10/03/11	14:38	0,9
CO2_JU_P2-024	401	0,06	517685	7072218	4179	10/03/11	14:44	0,6
CO2_JU_P2-027	403	0,06	517593	7072221	4182	10/03/11	15:07	0,6
CO2_JU_P2-031	405	0,08	517475	7072228	4182	10/03/11	15:34	0,8
CO2_JU_P2-032	411	0,10	517444	7072226	4182	10/03/11	15:43	1,1
CO2_JU_P2-034	404	0,07	517382	7072225	4185	10/03/11	15:56	0,8
CO2_JU_P2-035	404	0,06	517345	7072227	4184	10/03/11	16:01	0,6
CO2_JU_P2-036	401	0,05	517326	7072227	4193	10/03/11	16:08	0,6
CO2_JU_P2-038	400	0,05	517261	7072228	4185	10/03/11	16:23	0,5
CO2_JU_P2-039	402	0,06	517231	7072227	4187	10/03/11	16:29	0,6
CO2_JU_P1-242	408	0,10	522925	7072334	4415	11/03/11	13:06	1,0
CO2_JU_P1-244	406	0,09	522977	7072362	4420	11/03/11	12:58	0,9
CO2_JU_P1-245	408	0,09	523008	7072378	4427	11/03/11	12:48	1,0
CO2_JU_P1-246	413	0,13	523033	7072390	4431	11/03/11	12:41	1,3
CO2_JU_P1-247	409	0,11	523059	7072405	4431	11/03/11	12:32	1,1
CO2_JU_P1-248	414	0,13	523086	7072422	4438	11/03/11	12:25	1,4
CO2_JU_P1-250	406	0,07	523136	7072449	4443	11/03/11	12:13	0,7
CO2_JU_P1-252	405	0,07	523194	7072476	4449	11/03/11	12:06	0,7
CO2_JU_P1-253	411	0,10	523219	7072494	4453	11/03/11	12:00	1,0
CO2_JU_P1-254	409	0,09	523247	7072504	4455	11/03/11	11:53	1,0
CO2_JU_P1-255	429	0,15	523269	7072519	4453	11/03/11	11:46	1,5
CO2_JU_P1-257	406	0,08	523320	7072546	4454	11/03/11	11:39	0,8
CO2_JU_P1-269	409	0,06	523643	7072713	4502	11/03/11	10:42	0,6
CO2_JU_P2-040	400	0,05	517202	7072229	4188	11/03/11	14:57	0,5
CO2_JU_P2-041	407	0,08	517174	7072229	4188	11/03/11	15:04	0,8
CO2_JU_P2-042	405	0,07	517143	7072229	4194	11/03/11	15:10	0,7
CO2_JU_P2-044	407	0,09	517084	7072226	4193	11/03/11	15:22	0,9
CO2_JU_P2-045	399	0,04	517056	7072231	4194	11/03/11	15:28	0,5
CO2_JU_P2-046	399	0,04	517025	7072232	4192	11/03/11	15:35	0,5
CO2_JU_P2-047	404	0,06	516993	7072229	4187	11/03/11	15:41	0,6
CO2_JU_P2-048	399	0,04	516961	7072229	4186	11/03/11	15:47	0,5
CO2_JU_P2-049	400	0,05	516939	7072232	4190	11/03/11	15:54	0,5
CO2_JU_P2-050	405	0,08	516904	7072228	4185	11/03/11	16:00	0,8
CO2_JU_P2-051	401	0,05	516877	7072227	4189	11/03/11	16:08	0,5
CO2_JU_P2-052	404	0,07	516847	7072231	4192	11/03/11	16:16	0,7

CO2_JU_P1-175	449	0,06	521151	7071390	4116	12/03/11	17:59	0,6
CO2_JU_P1-199	402	0,05	521784	7071728	4177	12/03/11	15:06	0,5
CO2_JU_P1-201	402	0,05	521835	7071763	4180	12/03/11	14:56	0,5
CO2_JU_P1-203	403	0,07	521893	7071787	4187	12/03/11	14:47	0,7
CO2_JU_P1-211	406	0,08	522104	7071897	4201	12/03/11	12:53	0,8
CO2_JU_P1-212	405	0,07	522137	7071912	4195	12/03/11	12:46	0,7
CO2_JU_P1-213	409	0,10	522158	7071926	4207	12/03/11	12:35	1,0
CO2_JU_P1-215	409	0,07	522209	7071952	4222	12/03/11	12:26	0,7
CO2_JU_P1-218	403	0,06	522294	7071997	4250	12/03/11	12:03	0,6
CO2_JU_P1-219	424	0,05	522315	7072010	4248	12/03/11	11:53	0,6
CO2_JU_P1-220	413	0,12	522342	7072025	4256	12/03/11	11:40	1,2
CO2_JU_P1-222	460	0,05	522399	7072050	4270	12/03/11	11:23	0,5
CO2_JU_P1-224	406	0,07	522448	7072080	4281	12/03/11	11:11	0,7
CO2_JU_P1-118	400	0,04	519642	7070587	4095	13/03/11	16:06	0,4
CO2_JU_P1-122	401	0,06	519748	7070645	4090	13/03/11	15:52	0,6
CO2_JU_P1-130	397	0,04	519958	7070758	4086	13/03/11	15:31	0,4
CO2_JU_P1-133	412	0,13	520039	7070797	4091	13/03/11	15:02	1,3
CO2_JU_P1-139	398	0,04	520201	7070885	4088	13/03/11	14:42	0,4
CO2_JU_P1-140	406	0,09	520227	7070894	4077	13/03/11	14:34	0,9
CO2_JU_P1-146	401	0,06	520384	7070982	4075	13/03/11	14:12	0,6
CO2_JU_P1-147	434	0,08	520410	7070995	4075	13/03/11	14:03	0,8
CO2_JU_P1-156	401	0,05	520645	7071124	4100	13/03/11	11:24	0,5
CO2_JU_P1-158	409	0,10	520701	7071151	4104	13/03/11	11:40	1,0
CO2_JU_P1-159	411	0,10	520731	7071167	4103	13/03/11	11:15	1,1
CO2_JU_P1-161	405	0,08	520779	7071193	4105	13/03/11	11:00	0,8
CO2_JU_P1-162	431	0,16	520806	7071207	4104	13/03/11	10:53	1,7
CO2_JU_P1-163	455	0,10	520839	7071222	4111	13/03/11	10:44	1,1
CO2_JU_P1-164	425	0,14	520858	7071234	4104	13/03/11	10:25	1,4
CO2_JU_P1-166	401	0,05	520913	7071261	4105	13/03/11	10:18	0,5
CO2_JU_P1-167	431	0,17	520939	7071277	4106	13/03/11	10:09	1,8
CO2_JU_P1-168	423	0,12	520964	7071288	4107	13/03/11	10:02	1,3
CO2_JU_P1-169	445	0,22	520992	7071302	4109	13/03/11	09:54	2,2
CO2_JU_P1-170	451	0,19	521017	7071318	4099	13/03/11	09:46	2,0
CO2_JU_P1-171	455	0,25	521045	7071335	4104	13/03/11	09:33	2,6
CO2_JU_P1-172	437	0,18	521071	7071347	4110	13/03/11	09:25	1,9
CO2_JU_P1-173	448	0,22	521098	7071362	4112	13/03/11	09:12	2,3
CO2_JU_P1-174	444	0,10	521127	7071377	4115	13/03/11	09:01	1,1
CO2_JU_P1-048	404	0,06	517789	7069603	4075	14/03/11	15:39	0,7
CO2_JU_P1-050	400	0,05	517840	7069627	4081	14/03/11	15:30	0,5
CO2_JU_P1-052	401	0,05	517891	7069658	4074	14/03/11	15:22	0,6
CO2_JU_P1-056	402	0,06	518003	7069717	4082	14/03/11	15:09	0,6
CO2_JU_P1-058	400	0,06	518052	7069743	4086	14/03/11	15:03	0,6
CO2_JU_P1-060	402	0,07	518107	7069773	4079	14/03/11	14:56	0,7
CO2_JU_P1-062	404	0,07	518162	7069801	4079	14/03/11	14:49	0,8
CO2_JU_P1-066	404	0,07	518265	7069857	4084	14/03/11	14:23	0,8

CO2_JU_P1-067	410	0,11	518287	7069868	4081	14/03/11	14:19	1,1
CO2_JU_P1-071	405	0,07	518396	7069929	4082	14/03/11	14:01	0,7
CO2_JU_P1-073	403	0,07	518452	7069955	4086	14/03/11	13:53	0,7
CO2_JU_P1-074	406	0,07	518484	7069970	4085	14/03/11	13:47	0,8
CO2_JU_P1-075	403	0,07	518506	7069978	4092	14/03/11	13:41	0,7
CO2_JU_P1-076	410	0,06	518535	7069989	4089	14/03/11	11:53	0,6
CO2_JU_P1-077	408	0,10	518558	7070015	4088	14/03/11	11:47	1,0
CO2_JU_P1-078	412	0,11	518583	7070027	4089	14/03/11	11:41	1,2
CO2_JU_P1-079	409	0,08	518610	7070037	4088	14/03/11	11:31	0,9
CO2_JU_P1-080	407	0,07	518636	7070054	4090	14/03/11	11:25	0,8
CO2_JU_P1-081	409	0,09	518659	7070065	4089	14/03/11	11:19	0,9
CO2_JU_P1-082	404	0,06	518689	7070084	4085	14/03/11	11:12	0,6
CO2_JU_P1-083	406	0,08	518715	7070097	4093	14/03/11	11:05	0,8
CO2_JU_P1-084	413	0,11	518742	7070108	4090	14/03/11	10:59	1,2
CO2_JU_P1-085	406	0,09	518768	7070121	4087	14/03/11	10:53	0,9
CO2_JU_P1-086	410	0,10	518793	7070136	4086	14/03/11	10:46	1,1
CO2_JU_P1-087	408	0,08	518823	7070154	4084	14/03/11	10:35	0,9
CO2_JU_P1-088	408	0,09	518845	7070166	4084	14/03/11	10:25	0,9
CO2_JU_P1-089	410	0,08	518873	7070177	4088	14/03/11	10:12	0,9
CO2_JU_P1-090	416	0,09	518901	7070191	4088	14/03/11	10:05	0,9
CO2_JU_P1-091	435	0,18	518927	7070206	4090	14/03/11	09:59	1,9
CO2_JU_P1-092	444	0,20	518953	7070223	4092	14/03/11	09:51	2,1
CO2_JU_P1-093	421	0,12	518982	7070235	4091	14/03/11	09:46	1,3
CO2_JU_P1-094	407	0,07	519008	7070252	4089	14/03/11	09:40	0,8
CO2_JU_P1-095	414	0,11	519032	7070264	4090	14/03/11	09:30	1,2
CO2_JU_P1-096	407	0,05	519062	7070279	4092	14/03/11	09:23	0,6
CO2_JU_P1-097	415	0,08	519084	7070293	4094	14/03/11	09:17	0,9
CO2_JU_P1-098	427	0,12	519109	7070304	4094	14/03/11	08:54	1,3
CO2_JU_P3-012	401	0,05	518116	7067564	3956	15/03/11	10:41	0,6
CO2_JU_P3-015	418	0,14	517960	7067473	3948	15/03/11	11:14	1,5
CO2_JU_P3-016	432	0,16	517931	7067463	3941	15/03/11	11:20	1,7
CO2_JU_P3-017	407	0,08	517902	7067468	3939	15/03/11	11:31	0,9
CO2_JU_P3-021	395	0,04	517725	7067513	3910	15/03/11	12:00	0,4
CO2_JU_P3-023	404	0,08	517623	7067512	3926	15/03/11	12:12	0,9
CO2_JU_P3-026	401	0,06	517503	7067613	3915	15/03/11	13:23	0,6
CO2_JU_P3-027	410	0,12	517458	7067656	3904	15/03/11	13:30	1,3
CO2_JU_P3-028	402	0,06	517412	7067679	3906	15/03/11	13:46	0,6
CO2_JU_P3-030	403	0,06	517290	7067606	3902	15/03/11	13:59	0,6
CO2_JU_P3-031	397	0,04	517261	7067555	3901	15/03/11	14:06	0,4
CO2_JU_P3-036	400	0,06	517103	7067374	3897	15/03/11	14:52	0,6
CO2_JU_P3-050	401	0,06	516315	7067018	3881	15/03/11	16:31	0,7
CO2_JU_P7-007	403	0,06	520966	7071337	4109	17/03/11	09:19	0,6
CO2_JU_P7-008	403	0,06	520908	7071359	4106	17/03/11	09:25	0,6
CO2_JU_P7-009	402	0,05	520849	7071375	4102	17/03/11	09:31	0,6
CO2_JU_P7-010	429	0,09	520790	7071391	4099	17/03/11	09:41	1,0

CO2_JU_P7-011	402	0,05	520731	7071412	4096	17/03/11	09:49	0,5
CO2_JU_P7-013	402	0,05	520609	7071456	4091	17/03/11	10:08	0,5
CO2_JU_P7-014	401	0,06	520540	7071468	4088	17/03/11	10:16	0,6
CO2_JU_P7-015	437	0,20	520469	7071485	4092	17/03/11	10:37	2,0
CO2_JU_P7-016	438	0,21	520438	7071492	4090	17/03/11	10:45	2,2
CO2_JU_P7-016B	421	0,14	518104	7072255	4090	17/03/11	10:24	1,4
CO2_JU_P7-016C	426	0,15	518105	7072255	4091	17/03/11	10:30	1,5
CO2_JU_P7-017	432	0,14	520409	7071504	4093	17/03/11	11:17	1,4
CO2_JU_P7-018	417	0,12	520382	7071520	4093	17/03/11	11:25	1,2
CO2_JU_P7-019	411	0,12	520357	7071527	4085	17/03/11	08:10	1,2
CO2_JU_P7-020	432	0,18	520322	7071537	4091	17/03/11	11:31	1,9
CO2_JU_P7-021	413	0,13	520294	7071555	4093	17/03/11	11:37	1,3
CO2_JU_P7-022	408	0,10	520261	7071570	4095	17/03/11	11:43	1,1
CO2_JU_P7-023	412	0,13	520201	7071582	4095	17/03/11	11:50	1,3
CO2_JU_P7-025	411	0,09	520066	7071609	4087	17/03/11	12:51	0,9
CO2_JU_P7-026	403	0,08	520012	7071631	4087	17/03/11	12:59	0,8
CO2_JU_P7-027	402	0,07	519959	7071644	4091	17/03/11	13:05	0,7
CO2_JU_P7-028	403	0,08	519900	7071662	4090	17/03/11	13:11	0,8
CO2_JU_P7-029	405	0,09	519850	7071680	4098	17/03/11	13:18	1,0
CO2_JU_P7-030	399	0,04	519792	7071700	4097	17/03/11	13:26	0,4
CO2_JU_P7-031	399	0,05	519735	7071722	4096	17/03/11	13:32	0,5
CO2_JU_P7-032	399	0,05	519675	7071741	4100	17/03/11	13:40	0,5
CO2_JU_P7-033	399	0,05	519617	7071765	4102	17/03/11	13:48	0,5
CO2_JU_P7-034	406	0,09	519549	7071795	4103	17/03/11	13:54	0,9
CO2_JU_P7-035	404	0,08	519484	7071814	4107	17/03/11	13:59	0,9
CO2_JU_P7-036	399	0,05	519424	7071840	4109	17/03/11	14:05	0,5
CO2_JU_P7-037	406	0,08	519357	7071862	4111	17/03/11	14:11	0,9
CO2_JU_P7-039	403	0,06	519214	7071907	4114	17/03/11	14:26	0,7
CO2_JU_P7-042	403	0,07	518998	7071965	4129	17/03/11	14:44	0,7
CO2_JU_P7-043	404	0,08	518928	7071985	4132	17/03/11	14:50	0,8
CO2_JU_P7-045	401	0,06	518780	7072030	4136	17/03/11	15:03	0,6
CO2_JU_P7-046	402	0,07	518703	7072058	4140	17/03/11	15:09	0,7
CO2_JU_P7-047	398	0,04	518634	7072087	4143	17/03/11	15:15	0,5
CO2_JU_P7-052	401	0,06	518278	7072195	4155	17/03/11	15:47	0,6
CO2_JU_P7-053	401	0,05	518212	7072206	4163	17/03/11	15:52	0,5
CO2_JU_G1_0,0	402	0,05	521042	7071331	4117	14/04/11	14:11	0,6
CO2_JU_G1_0,1	402	0,06	521052	7071364	4120	14/04/11	14:28	0,7
CO2_JU_G1_0,-8	405	0,07	521047	7071098	4106	14/04/11	16:08	0,7
CO2_JU_G1_-1,2	400	0,05	521022	7071395	4114	14/04/11	15:06	0,6
CO2_JU_G1_-1,-3	405	0,08	521017	7071246	4104	14/04/11	15:39	0,8
CO2_JU_G1_-1,-4	402	0,06	521017	7071215	4109	14/04/11	15:45	0,6
CO2_JU_G1_-1,-6	399	0,04	521018	7071156	4105	14/04/11	15:52	0,5
CO2_JU_G1_-1,-8	403	0,07	521017	7071097	4104	14/04/11	16:01	0,8
CO2_JU_G1_-7,-1	401	0,06	520812	7071300	4106	15/04/11	15:48	0,6
CO2_JU_G1_0,3	408	0,10	521052	7071420	4107	16/04/11	11:51	1,0

CO2_JU_G1_0,5	406	0,09	521054	7071485	4104	16/04/11	11:40	1,0
CO2_JU_G1_1,4	415	0,12	521084	7071446	4114	16/04/11	12:04	1,2
CO2_JU_G1_2,1	404	0,08	521106	7071359	4112	16/04/11	12:21	0,8
CO2_JU_G1_2,3	403	0,07	521117	7071421	4113	16/04/11	12:13	0,7
CO2_JU_G1_-2,-3	403	0,07	520993	7071240	4111	16/04/11	15:41	0,7
CO2_JU_G1_-2,5	402	0,07	520996	7071486	4105	16/04/11	11:29	0,7
CO2_JU_G1_-2,-5	405	0,08	520987	7071187	4103	16/04/11	16:51	0,8
CO2_JU_G1_-3,-2	397	0,04	520961	7071272	4104	16/04/11	15:33	0,4
CO2_JU_G1_-3,4	416	0,10	520966	7071454	4105	16/04/11	11:16	1,0
CO2_JU_G1_-4,-3	403	0,08	520930	7071237	4109	16/04/11	15:49	0,8
CO2_JU_G1_-4,-5	400	0,05	520930	7071183	4099	16/04/11	16:59	0,5
CO2_JU_G1_-5,-2	408	0,10	520901	7071274	4104	16/04/11	15:25	1,1
CO2_JU_G1_-5,-4	404	0,07	520901	7071213	4105	16/04/11	16:35	0,7
CO2_JU_G1_-6,-3	400	0,04	520871	7071238	4107	16/04/11	15:58	0,5
CO2_JU_G1_-7,-4	403	0,07	520842	7071212	4101	16/04/11	16:29	0,7
CO2_JU_G1_-8,-5	402	0,06	520807	7071178	4104	16/04/11	17:20	0,6
CO2_JU_G1_-9,-4	400	0,05	520781	7071213	4103	16/04/11	16:22	0,5
CO2_JU_G1_0,-4	405	0,08	520430	7071379	4097	17/04/11	15:38	0,8
CO2_JU_G1_0,-6	405	0,07	520433	7071312	4093	17/04/11	15:46	0,8
CO2_JU_G1_1,0B	403	0,07	521075	7071327	4117	17/04/11	12:25	0,8
CO2_JU_G1_1,1	401	0,06	521085	7071360	4112	17/04/11	12:17	0,6
CO2_JU_G1_1,-2	409	0,08	521083	7071271	4110	17/04/11	10:24	0,9
CO2_JU_G1_1,-4	406	0,07	521080	7071209	4108	17/04/11	10:31	0,7
CO2_JU_G1_2,0	406	0,08	521108	7071333	4109	17/04/11	11:11	0,8
CO2_JU_G1_2,-1	430	0,17	521112	7071302	4112	17/04/11	11:03	1,8
CO2_JU_G1_2,-2B	407	0,09	521109	7071267	4114	17/04/11	12:40	0,9
CO2_JU_G1_2,-3	405	0,07	521106	7071242	4112	17/04/11	10:55	0,8
CO2_JU_G1_-2,4	401	0,06	520992	7071451	4109	17/04/11	13:32	0,7
CO2_JU_G1_3,0	423	0,13	521140	7071331	4108	17/04/11	11:21	1,4
CO2_JU_G1_3,0B	407	0,09	521140	7071331	4108	17/04/11	11:28	0,9
CO2_JU_G1_3,-1	405	0,07	521139	7071302	4112	17/04/11	11:38	0,7
CO2_JU_G1_3,2	401	0,06	521142	7071393	4119	17/04/11	11:51	0,6
CO2_JU_G1_3,-2	402	0,07	521135	7071270	4116	17/04/11	12:46	0,7
CO2_JU_G1_3,-3	400	0,06	521138	7071240	4111	17/04/11	12:54	0,6
CO2_JU_G1_-3,5	406	0,09	520967	7071485	4110	17/04/11	13:19	1,0
CO2_JU_G2_0,0	401	0,06	520438	7071494	4092	17/04/11	15:24	0,6
CO2_JU_G2_-1,-1	401	0,06	520404	7071467	4094	17/04/11	16:08	0,6
CO2_JU_G2_-2,-2	401	0,05	520377	7071436	4092	17/04/11	16:21	0,6
CO2_JU_G2_-2,-4	398	0,04	520371	7071377	4093	17/04/11	16:27	0,4
CO2_JU_G2_-3,-1	398	0,05	520343	7071469	4092	17/04/11	16:51	0,5
CO2_JU_G2_-3,-5	400	0,05	520339	7071345	4089	17/04/11	16:36	0,5
CO2_JU_G2_-4,0	402	0,07	520315	7071496	4094	17/04/11	16:58	0,7
CO2_JU_G2_0,0B	406	0,07	520438	7071499	4096	18/04/11	12:14	0,8
CO2_JU_G2_0,-1	403	0,07	520430	7071470	4096	18/04/11	15:25	0,7
CO2_JU_G2_0,2	406	0,08	520437	7071556	4096	18/04/11	12:07	0,8

CO2_JU_G2_0,4	402	0,06	520436	7071617	4096	18/04/11	12:00	0,6
CO2_JU_G2_-1,5	400	0,05	520407	7071651	4101	18/04/11	11:47	0,5
CO2_JU_G2_1,-5	404	0,07	520462	7071350	4094	18/04/11	15:34	0,7
CO2_JU_G2_-2,1	405	0,07	520372	7071527	4099	18/04/11	13:24	0,8
CO2_JU_G2_-2,-1	402	0,06	520374	7071469	4092	18/04/11	15:11	0,6
CO2_JU_G2_-2,2	402	0,06	520376	7071558	4098	18/04/11	11:23	0,6
CO2_JU_G2_-2,4	404	0,06	520375	7071618	4097	18/04/11	11:17	0,7
CO2_JU_G2_-3,2	427	0,16	520349	7071556	4099	18/04/11	13:16	1,7
CO2_JU_G2_-3,3	407	0,09	520346	7071586	4096	18/04/11	10:40	0,9
CO2_JU_G2_-3,5	414	0,10	520345	7071651	4094	18/04/11	10:47	1,1
CO2_JU_G2_-3,6	416	0,14	520346	7071678	4100	18/04/11	10:53	1,5
CO2_JU_G2_-3,7	408	0,10	520349	7071709	4102	18/04/11	11:01	1,1
CO2_JU_G2_-4,1B	403	0,07	520311	7071523	4097	18/04/11	12:47	0,7
CO2_JU_G2_-4,2	404	0,06	520314	7071559	4098	18/04/11	10:15	0,6
CO2_JU_G2_-4,3	409	0,12	520319	7071588	4099	18/04/11	13:09	1,2
CO2_JU_G2_-4,3B	399	0,05	520318	7071588	4102	18/04/11	16:49	0,5
CO2_JU_G2_-5,2	410	0,11	520291	7071561	4102	18/04/11	13:01	1,1
CO2_JU_G2_-5,5	403	0,05	520283	7071646	4100	18/04/11	09:55	0,5
CO2_JU_P7_430B	409	0,12	520322	7071532	4096	18/04/11	12:56	1,2
CO2_JU_G3_0,0	435	0,19	519025	7070250	4097	19/04/11	12:14	1,9
CO2_JU_G3_0,1	415	0,14	519020	7070274	4095	19/04/11	12:08	1,4
CO2_JU_G3_0,-1	412	0,12	519021	7070219	4087	19/04/11	12:26	1,3
CO2_JU_G3_0,2	412	0,11	519021	7070308	4092	19/04/11	12:02	1,2
CO2_JU_G3_0,-2	407	0,09	519022	7070187	4087	19/04/11	12:33	1,0
CO2_JU_G3_0,3	424	0,13	519020	7070340	4095	19/04/11	11:46	1,4
CO2_JU_G3_0,4	406	0,09	519012	7070369	4094	19/04/11	11:53	0,9
CO2_JU_G3_1,0	409	0,08	519048	7070252	4086	19/04/11	11:25	0,9
CO2_JU_G3_-1,0	402	0,07	518990	7070247	4088	19/04/11	12:53	0,7
CO2_JU_G3_-1,-1	405	0,09	518989	7070215	4089	19/04/11	12:46	0,9
CO2_JU_G3_1,2	412	0,10	519047	7070308	4097	19/04/11	11:32	1,1
CO2_JU_G3_-1,2	403	0,07	518988	7070307	4091	19/04/11	12:59	0,7
CO2_JU_G3_1,-2	409	0,09	519052	7070189	4089	19/04/11	11:19	0,9
CO2_JU_G3_1,3	408	0,07	519051	7070338	4096	19/04/11	11:38	0,7
CO2_JU_G3_-1,3	412	0,12	518990	7070337	4090	19/04/11	14:09	1,3
CO2_JU_G3_1,4	400	0,05	519045	7070364	4094	19/04/11	15:30	0,5
CO2_JU_G3_1,-4	408	0,09	519051	7070130	4085	19/04/11	11:11	1,0
CO2_JU_G3_2,1	406	0,06	519082	7070279	4094	19/04/11	10:53	0,7
CO2_JU_G3_-2,1	406	0,09	518961	7070279	4092	19/04/11	13:05	0,9
CO2_JU_G3_2,-1	408	0,08	519082	7070216	4098	19/04/11	10:58	0,9
CO2_JU_G3_-2,-1	401	0,07	518959	7070217	4094	19/04/11	13:13	0,7
CO2_JU_G3_2,-3	409	0,09	519081	7070156	4081	19/04/11	11:05	1,0
CO2_JU_G3_-3,0	408	0,09	518932	7070250	4092	19/04/11	13:27	1,0
CO2_JU_G3_3,2	405	0,06	519109	7070305	4088	19/04/11	10:26	0,6
CO2_JU_G3_-3,-2	399	0,06	518929	7070185	4092	19/04/11	13:19	0,6
CO2_JU_G3_-4,-1	406	0,08	518900	7070216	4093	19/04/11	13:34	0,8

CO2_JU_G3_-4,-2	402	0,05	518902	7070189	4096	19/04/11	13:40	0,5
CO2_JU_G3_-4,-3	400	0,05	518901	7070157	4089	19/04/11	13:46	0,6
CO2_JU_G3_-5,0	403	0,07	518873	7070248	4090	19/04/11	14:00	0,7
CO2_JU_G3_-5,-2	410	0,11	518874	7070188	4090	19/04/11	13:53	1,1
CO2_JU_G4_0,0	403	0,06	518086	7072199	4165	20/04/11	12:59	0,7
CO2_JU_G4_0,2	414	0,12	518083	7072261	4169	20/04/11	11:40	1,3
CO2_JU_G4_1,0	404	0,08	518116	7072196	4162	20/04/11	13:14	0,8
CO2_JU_G4_1,1	409	0,09	518115	7072228	4165	20/04/11	12:45	0,9
CO2_JU_G4_-1,1	408	0,09	518055	7072232	4162	20/04/11	11:34	1,0
CO2_JU_G4_1,-1	401	0,06	518124	7072169	4168	20/04/11	14:00	0,6
CO2_JU_G4_-1,-1	403	0,07	518056	7072169	4170	20/04/11	14:06	0,7
CO2_JU_G4_1,2	411	0,12	518114	7072260	4160	20/04/11	12:16	1,2
CO2_JU_G4_1,2B	403	0,07	518113	7072267	4167	20/04/11	15:39	0,7
CO2_JU_G4_1,3	407	0,07	518113	7072291	4167	20/04/11	11:00	0,7
CO2_JU_G4_-1,3	407	0,07	518054	7072292	4166	20/04/11	11:07	0,7
CO2_JU_G4_-2,0	402	0,06	518030	7072201	4169	20/04/11	12:53	0,6
CO2_JU_G4_2,1	414	0,13	518147	7072231	4162	20/04/11	12:40	1,4
CO2_JU_G4_2,1B	404	0,08	518145	7072235	4163	20/04/11	15:46	0,8
CO2_JU_G4_2,2	432	0,17	518143	7072260	4164	20/04/11	11:46	1,8
CO2_JU_G4_-2,2	412	0,11	518027	7072261	4166	20/04/11	11:14	1,1
CO2_JU_G4_2,2B	399	0,05	518143	7072265	4165	20/04/11	15:32	0,5
CO2_JU_G4_2,4	405	0,06	518142	7072323	4164	20/04/11	10:47	0,6
CO2_JU_G4_3,1	409	0,10	518178	7072231	4161	20/04/11	12:34	1,0
CO2_JU_G4_-3,1	407	0,07	517998	7072234	4171	20/04/11	11:27	0,7
CO2_JU_G4_3,-1	407	0,09	518173	7072171	4169	20/04/11	13:54	0,9
CO2_JU_G4_3,2	413	0,12	518175	7072257	4159	20/04/11	12:22	1,3
CO2_JU_G4_-3,2	412	0,10	517993	7072266	4165	20/04/11	11:20	1,0
CO2_JU_G4_3,2B	401	0,06	518174	7072262	4164	20/04/11	15:26	0,6
CO2_JU_G4_3,3	413	0,11	518174	7072293	4164	20/04/11	10:53	1,1
CO2_JU_G4_3,3B	400	0,05	518170	7072296	4162	20/04/11	15:21	0,5
CO2_JU_G4_4,1	410	0,12	518205	7072227	4157	20/04/11	12:28	1,2
CO2_JU_G4_001	403	0,06	518117	7072262	4165	14/05/11	11:30	0,6
CO2_JU_G4_002	409	0,10	518117	7072262	4165	14/05/11	12:25	1,0
CO2_JU_G4_003	405	0,08	518117	7072262	4165	14/05/11	13:00	0,9
CO2_JU_G4_004	399	0,06	518117	7072262	4165	14/05/11	13:22	0,6
CO2_JU_G4_005	408	0,10	518117	7072262	4165	14/05/11	13:53	1,0
CO2_JU_G4_006	402	0,08	518117	7072262	4165	14/05/11	14:46	0,9
CO2_JU_G4_007	399	0,06	518117	7072262	4165	14/05/11	15:26	0,6
CO2_JU_G4_008	402	0,08	518117	7072262	4165	14/05/11	15:58	0,9
CO2_JU_G4_009	400	0,06	518117	7072262	4165	14/05/11	16:30	0,6
CO2_JU_G4_04B	407	0,10	518117	7072262	4165	14/05/11	13:28	1,0
CO2_JU_G4_1,2_3	400	0,04	518145	7072232	4164	14/05/11	10:47	0,4
CO2_JU_G4_431	408	0,11	518141	7072262	4163	14/05/11	13:46	1,1
CO2_JU_G4_431B	405	0,10	518141	7072262	4163	14/05/11	14:10	1,0
CO2_JU_G1_0,0B	424	0,14	521046	7071331	4116	15/05/11	12:15	1,5

CO2_JU_G1_001	406	0,11	521043	7071330	4119	15/05/11	12:32	1,1
CO2_JU_G1_002	401	0,08	521043	7071330	4119	15/05/11	12:58	0,8
CO2_JU_G1_003	397	0,05	521043	7071330	4119	15/05/11	13:32	0,6
CO2_JU_G1_004	398	0,06	521043	7071330	4119	15/05/11	14:02	0,6
CO2_JU_G1_005	395	0,04	521043	7071330	4119	15/05/11	14:42	0,4
CO2_JU_G1_02B	400	0,07	521043	7071330	4119	15/05/11	13:26	0,8
CO2_JU_G1_2,-1B	423	0,09	521116	7071296	4121	15/05/11	12:06	1,0
CO2_JU_G1_450B	413	0,12	521017	7071318	4108	15/05/11	12:25	1,3
CO2_JU_G1_015	413	0,12	521043	7071330	4119	16/05/11	11:03	1,3
CO2_JU_G1_016	424	0,14	521043	7071330	4119	16/05/11	11:21	1,5
CO2_JU_G1_017	412	0,12	521043	7071330	4119	16/05/11	11:36	1,3
CO2_JU_G1_018	404	0,08	521043	7071330	4119	16/05/11	11:50	0,9
CO2_JU_G1_019	408	0,10	521043	7071330	4119	16/05/11	12:06	1,1
CO2_JU_G1_020	401	0,07	521043	7071330	4119	16/05/11	12:21	0,7
CO2_JU_G3_0,0B	408	0,09	519020	7070247	4105	16/05/11	12:45	0,9
CO2_JU_G3_001	401	0,07	519019	7070246	4097	16/05/11	12:57	0,7
CO2_JU_G3_002	407	0,10	519019	7070246	4097	16/05/11	13:32	1,0
CO2_JU_G3_003	401	0,06	519019	7070246	4097	16/05/11	14:04	0,6
CO2_JU_G3_004	403	0,07	519019	7070246	4097	16/05/11	14:32	0,8
CO2_JU_G3_005	403	0,07	519019	7070246	4097	16/05/11	15:01	0,7
CO2_JU_G3_006	405	0,09	519019	7070246	4097	16/05/11	15:31	0,9
CO2_JU_G3_007	398	0,05	519019	7070246	4097	16/05/11	16:02	0,6
CO2_JU_G3_008	399	0,05	519019	7070246	4097	16/05/11	16:31	0,6
CO2_JU_P1_92B	403	0,07	518954	7070220	4100	16/05/11	12:51	0,7
CO2_JU_G3_015	400	0,05	519019	7070246	4097	17/05/11	11:33	0,6
CO2_JU_G3_016	399	0,05	519019	7070246	4097	17/05/11	11:59	0,5
CO2_JU_G5_4,0	397	0,04	500403	7066708	3605	17/05/11	15:01	0,5
CO2_JU_G5_0,7	404	0,09	500276	7066890	3604	18/05/11	11:45	1,0
CO2_JU_G5_0,9	400	0,07	500272	7066947	3604	18/05/11	13:15	0,8
CO2_JU_G5_1,6	408	0,09	500306	7066858	3604	18/05/11	11:13	1,0
CO2_JU_G5_1,8	401	0,08	500305	7066913	3608	18/05/11	12:41	0,8
CO2_JU_G5_2,7	403	0,08	500343	7066881	3604	18/05/11	11:51	0,9
CO2_JU_G5_2,9	397	0,05	500338	7066946	3606	18/05/11	13:21	0,6
CO2_JU_G5_3,6	403	0,07	500364	7066857	3603	18/05/11	11:07	0,8
CO2_JU_G5_3,8	399	0,07	500364	7066916	3604	18/05/11	12:35	0,8
CO2_JU_G5_4,7	406	0,10	500393	7066886	3606	18/05/11	11:58	1,2
CO2_JU_G5_4,9	396	0,04	500401	7066944	3606	18/05/11	13:27	0,4
CO2_JU_G5_5,6	406	0,06	500425	7066856	3604	18/05/11	11:01	0,7
CO2_JU_G5_5,8	403	0,08	500423	7066915	3609	18/05/11	12:28	0,9
CO2_JU_G5_6,7	403	0,09	500456	7066883		18/05/11	12:04	1,0
CO2_JU_G5_7,6	401	0,06	500488	7066856	3607	18/05/11	10:50	0,7
CO2_JU_G5_7,8	402	0,08	500484	7066914	3608	18/05/11	12:23	0,9
CO2_JU_G5_8,5	399	0,04	500521	7066828	3608	18/05/11	10:38	0,5
CO2_JU_G5_8,7	403	0,09	500517	7066883	3611	18/05/11	12:11	1,1
CO2_JU_G5_8,9	395	0,05	500517	7066947	3606	18/05/11	13:42	0,5

CO2_JU_G5_9,8	409	0,10	500544	7066920	3610	18/05/11	12:17	1,2
---------------	-----	------	--------	---------	------	----------	-------	-----

A.2. Datos de flujo de CO2-DDS registrados en Colpitas

CODIGO	MAX_CO2 [ppm]	GRADIENTE [ppm s ⁻¹]	E [m]	N[m]	Z[m]	FECHA	HORA	FLUJO [gm ⁻² d ⁻¹]
CO2_COL_P1_006	6083	31,12	455399	8015024	4074	23-07-11	16:08	329,8
CO2_COL_P1_012	5564	29,25	455617	8015046	4083	23-07-11	17:12	309,7
CO2_COL_P1_004	1966	7,94	455387	8015034	4073	23-07-11	15:18	83,3
CO2_COL_P1_001	508	0,95	455424	8015022	4078	23-07-11	13:00	10,0
CO2_COL_P1_002	539	0,84	455420	8015026	4074	23-07-11	13:10	8,8
CO2_COL_P1_011	528	0,82	455530	8015010	4073	23-07-11	17:04	8,6
CO2_COL_P1_009	535	0,74	455449	8015016	4079	23-07-11	16:45	7,9
CO2_COL_P1_02B	494	0,55	455423	8015028	4071	23-07-11	14:47	5,8
CO2_COL_P1_003	461	0,40	455370	8015040	4075	23-07-11	14:58	4,2
CO2_COL_P1_010	420	0,18	455451	8014981	4076	23-07-11	16:53	1,9
CO2_COL_P1_008	420	0,17	455329	8015043	4079	23-07-11	16:35	1,8
CO2_COL_P1_013	427	0,17	455686	8015003	4082	23-07-11	17:24	1,8
CO2_COL_P1_036	7257	36,55	455169	8016228	4086	24-07-11	15:15	381,7
CO2_COL_P1_06B	5275	28,83	455399	8015024	4074	24-07-11	9:00	310,4
CO2_COL_P1_12B	4197	21,76	455617	8015046	4083	24-07-11	9:23	225,7
CO2_COL_P1_033	2646	12,57	455235	8016354	4092	24-07-11	14:39	131,9
CO2_COL_P1_032	2247	8,67	455202	8016278	4092	24-07-11	14:28	90,0
CO2_COL_P1_016	1249	5,06	455750	8014746	4096	24-07-11	9:44	51,0
CO2_COL_P1_024	779	2,19	455410	8014495	4078	24-07-11	11:33	23,1
CO2_COL_P1_018	604	1,17	455802	8014742	4087	24-07-11	10:07	12,4
CO2_COL_P1_022	573	1,15	455625	8014679	4086	24-07-11	10:57	12,2
CO2_COL_P1_023	611	0,84	455451	8014475	4081	24-07-11	11:19	8,9
CO2_COL_P1_031	506	0,68	455181	8016263	4097	24-07-11	14:17	7,1
CO2_COL_P1_038	480	0,53	455240	8016110	4084	24-07-11	15:39	5,6
CO2_COL_P1_019	465	0,43	455766	8014664	4093	24-07-11	10:28	4,6
CO2_COL_P1_035	478	0,43	455184	8016236	4086	24-07-11	15:02	4,5
CO2_COL_P1_034	467	0,39	455227	8016315	4093	24-07-11	14:50	4,1
CO2_COL_P1_025	443	0,23	455347	8014541	4078	24-07-11	11:46	2,5
CO2_COL_P1_045	415	0,17	454976	8015488	4079	24-07-11	16:53	1,8
CO2_COL_P1_026	414	0,15	455330	8014617	4072	24-07-11	11:55	1,5
CO2_COL_P1_020	419	0,14	455700	8014709	4084	24-07-11	10:40	1,5
CO2_COL_P1_017	414	0,13	455802	8014744	4091	24-07-11	9:54	1,4
CO2_COL_P1_040	406	0,13	455110	8016041	4087	24-07-11	15:56	1,4
CO2_COL_P1_037	412	0,12	455206	8016186	4081	24-07-11	15:30	1,2
CO2_COL_P1_039	403	0,10	455169	8016031	4084	24-07-11	15:47	1,1
CO2_COL_P1_041	400	0,08	455074	8015967	4089	24-07-11	16:11	0,8
CO2_COL_P1_015	421	0,08	455689	8014952	4083	24-07-11	9:31	0,8
CO2_COL_P1_027	396	0,06	455230	8014669	4073	24-07-11	12:10	0,6
CO2_COL_P1_044	396	0,05	454984	8015635	4084	24-07-11	16:44	0,6

CO2_COL_P1_028	396	0,05	455043	8016432	4098	24-07-11	13:45	0,5
CO2_COL_G1_002	3241	15,38	455398	8015026	4073	25-07-11	14:47	159,9
CO2_COL_G1_004	1417	3,84	455356	8015042	4075	25-07-11	15:00	40,3
CO2_COL_P1_058	947	2,96	454582	8016720	4122	25-07-11	10:43	31,2
CO2_COL_G1_007	640	1,46	455325	8015041	4078	25-07-11	15:24	15,4
CO2_COL_P1_057	572	1,05	454541	8016751	4125	25-07-11	10:33	11,0
CO2_COL_P1_055	585	0,76	454430	8017000	4130	25-07-11	10:01	8,0
CO2_COL_P1_047	522	0,67	454631	8016554	4108	25-07-11	8:58	7,1
CO2_COL_P1_049	499	0,55	454556	8016657	4115	25-07-11	9:16	5,9
CO2_COL_G1_006	454	0,36	455325	8015010	4074	25-07-11	15:17	3,7
CO2_COL_G1_003	461	0,31	455383	8015056	4072	25-07-11	14:54	3,3
CO2_COL_G1_005	450	0,28	455365	8015022	4077	25-07-11	15:11	2,9
CO2_COL_G1_008	439	0,27	455416	8015008	4076	25-07-11	15:32	2,8
CO2_COL_P1_064	446	0,25	455261	8015122	4073	25-07-11	12:29	2,6
CO2_COL_P1_050	427	0,20	454503	8016719	4113	25-07-11	9:23	2,1
CO2_COL_P1_062	418	0,18	455106	8016062	4087	25-07-11	11:49	2,0
CO2_COL_P1_048	415	0,14	454598	8016637	4114	25-07-11	9:08	1,5
CO2_COL_P1_052	419	0,14	454398	8016796	4118	25-07-11	9:35	1,5
CO2_COL_G1_001	418	0,10	455420	8015034	4074	25-07-11	14:40	1,0
CO2_COL_P1_063	406	0,10	455051	8016112	4090	25-07-11	11:57	1,0
CO2_COL_P1_046	408	0,08	454741	8016509	4110	25-07-11	8:46	0,8
CO2_COL_G3_019	9709	61,43	455189	8016353	4104	26-07-11	17:16	642,9
CO2_COL_G3_002	6528	34,50	455171	8016227	4093	26-07-11	14:40	358,0
CO2_COL_G3_004	517	0,71	455284	8016512	4102	26-07-11	15:01	7,4
CO2_COL_G3_020	511	0,60	455203	8016330	4103	26-07-11	17:24	6,3
CO2_COL_G3_008	472	0,50	455410	8016695	4113	26-07-11	15:28	5,2
CO2_COL_G2_003	456	0,45	449823	8011978	3948	26-07-11	10:08	4,9
CO2_COL_G2_008	454	0,39	449728	8011920	3960	26-07-11	10:47	4,2
CO2_COL_G3_003	452	0,28	455166	8016266	4096	26-07-11	14:48	2,9
CO2_COL_G3_001	431	0,27	455269	8016038	4086	26-07-11	14:27	2,8
CO2_COL_G3_005	429	0,24	455258	8016531	4097	26-07-11	15:07	2,5
CO2_COL_G2_009	425	0,21	449688	8011901	3959	26-07-11	10:53	2,2
CO2_COL_G2_013	416	0,19	449877	8011891	3961	26-07-11	11:20	2,0
CO2_COL_G3_010	416	0,19	455318	8016805	4119	26-07-11	15:43	2,0
CO2_COL_G3_009	417	0,18	455346	8016734	4113	26-07-11	15:35	1,9
CO2_COL_G3_006	415	0,17	455323	8016602	4106	26-07-11	15:14	1,8
CO2_COL_G2_005	409	0,13	449799	8011940	3955	26-07-11	10:24	1,4
CO2_COL_G2_007	408	0,12	449754	8011947	3964	26-07-11	10:39	1,2
CO2_COL_G2_006	403	0,09	449783	8011968	3950	26-07-11	10:30	1,0
CO2_COL_G2_010	399	0,08	449711	8011869	3954	26-07-11	11:00	0,9
CO2_COL_G3_011	400	0,08	455152	8016778	4131	26-07-11	15:59	0,8
CO2_COL_G3_007	399	0,08	455405	8016677	4116	26-07-11	15:22	0,8
CO2_COL_G2_012	423	0,06	449809	8011903	3962	26-07-11	11:14	0,7
CO2_COL_G3_013	396	0,05	455027	8016665	4123	26-07-11	16:22	0,5
CO2_COL_G3_016	395	0,05	455053	8016486	4108	26-07-11	16:54	0,5

CO2_COL_G3_017	393	0,05	455108	8016433	4103	26-07-11	17:01	0,5
CO2_COL_G3_015	394	0,04	455028	8016507	4110	26-07-11	16:44	0,5
CO2_COL_G3_041	9505	51,51	455189	8016352	4099	27-07-11	11:54	535,4
CO2_COL_G3_02C	3672	18,93	455171	8016227	4093	27-07-11	10:51	199,6
CO2_COL_G3_032	2784	13,19	455150	8016236	4098	27-07-11	10:30	138,7
CO2_COL_G3_02B	1556	6,62	455171	8016227	4093	27-07-11	10:46	69,8
CO2_COL_G3_046	1314	4,86	455216	8016360	4101	27-07-11	12:33	50,2
CO2_COL_G3_045	802	2,21	455201	8016364	4104	27-07-11	12:25	23,0
CO2_COL_G3_036	649	1,49	455180	8016247	4095	27-07-11	11:13	15,8
CO2_COL_G3_047	624	1,07	455246	8016367	4099	27-07-11	12:42	11,2
CO2_COL_G3_042	600	1,00	455175	8016355	4103	27-07-11	12:02	10,4
CO2_COL_G3_048	515	0,82	455235	8016328	4094	27-07-11	12:57	8,6
CO2_COL_G3_034	528	0,80	455185	8016208	4091	27-07-11	10:59	8,4
CO2_COL_G3_065	497	0,60	455196	8016371	4108	27-07-11	16:26	6,3
CO2_COL_G3_061	485	0,56	455323	8016425	4110	27-07-11	15:51	5,9
CO2_COL_G3_063	476	0,53	455272	8016394	4111	27-07-11	16:07	5,6
CO2_COL_G3_064	473	0,50	455256	8016380	4112	27-07-11	16:17	5,3
CO2_COL_G3_053	465	0,43	455208	8016247	4098	27-07-11	14:41	4,4
CO2_COL_P1_32B	463	0,41	455204	8016277	4095	27-07-11	11:26	4,4
CO2_COL_G3_024	431	0,37	455121	8016257	4103	27-07-11	9:44	3,9
CO2_COL_G3_056	429	0,25	455247	8016304	4103	27-07-11	15:14	2,6
CO2_COL_G3_059	428	0,24	455288	8016391	4103	27-07-11	15:36	2,5
CO2_COL_G3_035	447	0,24	455183	8016230	4092	27-07-11	11:06	2,5
CO2_COL_G3_049	428	0,23	455214	8016151	4087	27-07-11	14:11	2,4
CO2_COL_G3_052	429	0,22	455198	8016245	4093	27-07-11	14:32	2,3
CO2_COL_G3_037	423	0,19	455207	8016266	4099	27-07-11	11:20	2,0
CO2_COL_G3_051	422	0,19	455199	8016223	4094	27-07-11	14:26	2,0
CO2_COL_G3_060	420	0,18	455332	8016388	4107	27-07-11	15:43	1,9
CO2_COL_G3_023	403	0,13	455132	8016232	4096	27-07-11	9:36	1,4
CO2_COL_G3_030	402	0,13	455147	8016286	4102	27-07-11	10:18	1,3
CO2_COL_G3_043	411	0,12	455162	8016391	4106	27-07-11	12:09	1,2
CO2_COL_G3_026	398	0,10	455114	8016322	4106	27-07-11	9:58	1,1
CO2_COL_G3_039	401	0,09	455180	8016305	4098	27-07-11	11:36	1,0
CO2_COL_G3_055	402	0,09	455241	8016272	4103	27-07-11	15:08	0,9
CO2_COL_G3_062	404	0,09	455348	8016414	4111	27-07-11	15:57	0,9
CO2_COL_G3_044	404	0,09	455201	8016388	4102	27-07-11	12:18	0,9
CO2_COL_G3_050	441	0,08	455203	8016204	4088	27-07-11	14:19	0,9
CO2_COL_G3_021	408	0,08	455119	8016189	4099	27-07-11	9:07	0,8
CO2_COL_G3_057	398	0,06	455284	8016308	4105	27-07-11	15:21	0,7
CO2_COL_G3_054	396	0,06	455228	8016244	4101	27-07-11	14:47	0,6
CO2_COL_G3_066	394	0,05	455146	8016383	4112	27-07-11	16:38	0,5
CO2_COL_G3_058	392	0,04	455298	8016333	4104	27-07-11	15:27	0,5
CO2_COL_G1_053	7255	38,18	455640	8015033	4079	28-07-11	15:34	400,0
CO2_COL_G1_054	7257	36,77	455595	8015036	4071	28-07-11	15:48	385,3
CO2_COL_G1_062	5808	31,81	455642	8015077	4083	28-07-11	16:45	335,2

CO2_COL_G1_067	5118	26,58	455625	8015183	4079	28-07-11	17:28	289,6
CO2_COL_G1_060	3992	21,76	455598	8015050	4078	28-07-11	16:24	229,4
CO2_COL_G1_032	3104	15,37	455400	8015027	4071	28-07-11	12:11	162,7
CO2_COL_G1_031	1269	4,98	455393	8015029	4079	28-07-11	12:04	52,8
CO2_COL_G1_052	1015	3,34	455619	8015040	4081	28-07-11	15:28	35,0
CO2_COL_G1_066	977	3,23	455592	8015133	4083	28-07-11	17:15	34,1
CO2_COL_G1_041	779	2,27	455474	8015031	4075	28-07-11	14:14	24,0
CO2_COL_G1_059	757	2,04	455603	8015058	4080	28-07-11	16:18	21,5
CO2_COL_G1_051	648	1,51	455633	8015005	4081	28-07-11	15:22	15,8
CO2_COL_G1_011	613	1,29	455273	8015010	4074	28-07-11	9:33	13,9
CO2_COL_G1_043	513	0,76	455477	8015017	4069	28-07-11	14:34	8,0
CO2_COL_G1_063	533	0,75	455651	8015096	4085	28-07-11	16:55	8,0
CO2_COL_G1_064	513	0,70	455647	8015110	4082	28-07-11	17:01	7,4
CO2_COL_G1_039	482	0,61	455424	8014976	4071	28-07-11	14:00	6,4
CO2_COL_G1_025	472	0,47	455350	8015113	4075	28-07-11	11:13	5,0
CO2_COL_G1_058	473	0,47	455571	8015063	4086	28-07-11	16:12	5,0
CO2_COL_G1_010	459	0,38	455276	8014986	4075	28-07-11	9:28	4,1
CO2_COL_G1_017	455	0,37	455303	8015015	4074	28-07-11	10:16	4,0
CO2_COL_G1_026	429	0,24	455358	8015081	4080	28-07-11	11:19	2,6
CO2_COL_G1_024	428	0,23	455344	8015140	4075	28-07-11	11:07	2,5
CO2_COL_G1_016	414	0,16	455295	8015048	4071	28-07-11	10:07	1,8
CO2_COL_G1_018	413	0,16	455299	8014989	4072	28-07-11	10:28	1,7
CO2_COL_G1_020	413	0,15	455332	8014989	4075	28-07-11	10:41	1,6
CO2_COL_G1_050	412	0,14	455606	8015010	4078	28-07-11	15:15	1,5
CO2_COL_G1_028	411	0,13	455365	8014967	4073	28-07-11	11:34	1,4
CO2_COL_G1_038	410	0,13	455433	8014945	4072	28-07-11	12:58	1,4
CO2_COL_G1_033	417	0,13	455384	8015083	4077	28-07-11	12:19	1,4
CO2_COL_G1_065	416	0,13	455621	8015127	4083	28-07-11	17:09	1,4
CO2_COL_G1_037	411	0,13	455420	8015053	4080	28-07-11	12:42	1,3
CO2_COL_G1_061	405	0,13	455596	8015082	4079	28-07-11	16:39	1,3
CO2_COL_G1_022	412	0,12	455316	8015108	4076	28-07-11	10:54	1,3
CO2_COL_G1_030	407	0,11	455394	8015001	4072	28-07-11	11:48	1,2
CO2_COL_G1_021	411	0,11	455331	8015089	4077	28-07-11	10:48	1,2
CO2_COL_G1_029	407	0,11	455401	8014966	4077	28-07-11	11:40	1,2
CO2_COL_G1_012	406	0,11	455266	8015030	4077	28-07-11	9:40	1,2
CO2_COL_G1_013	406	0,11	455264	8015075	4072	28-07-11	9:47	1,1
CO2_COL_G1_057	407	0,11	455539	8015050	4081	28-07-11	16:07	1,1
CO2_COL_G1_014	406	0,09	455287	8015133	4075	28-07-11	9:54	1,0
CO2_COL_G1_045	405	0,09	455507	8015049	4077	28-07-11	14:46	1,0
CO2_COL_G1_015	404	0,09	455290	8015108	4075	28-07-11	10:00	0,9
CO2_COL_G1_046	399	0,08	455503	8015029	4071	28-07-11	14:51	0,8
CO2_COL_G1_048	400	0,07	455545	8014999	4070	28-07-11	15:04	0,8
CO2_COL_G1_044	400	0,07	455466	8015069	4075	28-07-11	14:40	0,8
CO2_COL_G1_040	405	0,07	455480	8014990	4074	28-07-11	14:07	0,7
CO2_COL_G1_023	402	0,07	455314	8015137	4072	28-07-11	11:00	0,7

CO2_COL_G1_056	405	0,07	455543	8015024	4078	28-07-11	16:02	0,7
CO2_COL_G1_036	398	0,06	455443	8015065	4079	28-07-11	12:36	0,6
CO2_COL_G1_042	401	0,06	455453	8015031	4071	28-07-11	14:26	0,6
CO2_COL_G1_027	396	0,05	455362	8014994	4073	28-07-11	11:29	0,6
CO2_COL_G1_019	396	0,05	455337	8014964	4072	28-07-11	10:36	0,5
CO2_COL_G1_034	399	0,05	455412	8015091	4076	28-07-11	12:24	0,5
CO2_COL_G1_009	404	0,04	455291	8014967	4076	28-07-11	9:20	0,5
CO2_COL_G1_035	395	0,04	455443	8015093	4076	28-07-11	12:30	0,4
CO2_COL_G1_115	68427	714,65	455684	8014743	4082	29-07-11	13:29	7486,6
CO2_COL_G1_114	30152	266,18	455681	8014762	4086	29-07-11	13:18	2797,8
CO2_COL_G1_123	15334	131,91	455723	8014685	4085	29-07-11	14:20	1382,7
CO2_COL_G1_077	8585	71,97	455633	8015329	4092	29-07-11	9:56	762,5
CO2_COL_G1_068	7347	67,57	455581	8015164	4074	29-07-11	9:09	728,8
CO2_COL_G1_078	7931	65,79	455595	8015343	4091	29-07-11	10:04	701,6
CO2_COL_G1_080	7685	61,28	455549	8015358	4087	29-07-11	10:15	652,0
CO2_COL_G1_072	4200	33,23	455610	8015211	4088	29-07-11	9:30	357,1
CO2_COL_G1_073	4060	30,90	455627	8015215	4094	29-07-11	9:35	332,0
CO2_COL_G1_074	3198	27,99	455662	8015210	4087	29-07-11	9:40	301,0
CO2_COL_G1_079	3534	28,00	455555	8015343	4088	29-07-11	10:10	299,2
CO2_COL_G1_090	2802	20,36	455528	8015377	4088	29-07-11	11:02	215,8
CO2_COL_G1_089	2063	14,56	455482	8015363	4079	29-07-11	10:56	154,2
CO2_COL_G1_099	1937	13,81	455542	8015447	4090	29-07-11	11:47	145,9
CO2_COL_G1_083	1991	13,76	455544	8015480	4089	29-07-11	10:30	144,2
CO2_COL_G1_084	1038	5,12	455530	8015496	4090	29-07-11	10:35	54,3
CO2_COL_G1_092	804	3,21	455613	8015382	4092	29-07-11	11:12	34,0
CO2_COL_G1_104	652	2,22	455648	8015059	4086	29-07-11	12:30	23,4
CO2_COL_G1_085	638	2,06	455502	8015498	4092	29-07-11	10:39	21,8
CO2_COL_G1_070	607	1,79	455541	8015176	4076	29-07-11	9:21	19,3
CO2_COL_G1_097	580	1,56	455519	8015530	4084	29-07-11	11:36	16,4
CO2_COL_G1_118	532	1,09	455803	8014578	4095	29-07-11	13:51	11,3
CO2_COL_G1_081	515	0,78	455546	8015388	4088	29-07-11	10:21	8,3
CO2_COL_G1_121	546	0,67	455847	8014561	4094	29-07-11	14:06	7,0
CO2_COL_G1_093	444	0,44	455641	8015431	4093	29-07-11	11:18	4,7
CO2_COL_G1_069	472	0,42	455562	8015147	4078	29-07-11	9:16	4,5
CO2_COL_G1_091	450	0,40	455581	8015390	4092	29-07-11	11:07	4,2
CO2_COL_G1_108	431	0,37	455685	8014977	4087	29-07-11	12:48	3,9
CO2_COL_G1_071	441	0,34	455575	8015183	4078	29-07-11	9:25	3,7
CO2_COL_G1_107	430	0,34	455665	8015002	4081	29-07-11	12:43	3,5
CO2_COL_G1_102	427	0,32	455591	8015117	4084	29-07-11	12:21	3,3
CO2_COL_G1_075	441	0,27	455662	8015254	4096	29-07-11	9:46	2,9
CO2_COL_G1_100	422	0,23	455577	8015428	4091	29-07-11	11:52	2,4
CO2_COL_G1_101	408	0,20	455627	8015277	4098	29-07-11	12:01	2,1
CO2_COL_G1_086	411	0,18	455504	8015468	4088	29-07-11	10:43	1,9
CO2_COL_G1_120	403	0,18	455860	8014414	4101	29-07-11	14:01	1,9
CO2_COL_G1_076	413	0,13	455653	8015287	4102	29-07-11	9:51	1,4

CO2_COL_G1_113	402	0,13	455705	8014810	4083	29-07-11	13:13	1,3
CO2_COL_G1_094	403	0,12	455596	8015444	4090	29-07-11	11:22	1,2
CO2_COL_G1_082	415	0,12	455546	8015417	4092	29-07-11	10:25	1,2
CO2_COL_G1_087	400	0,09	455487	8015433	4085	29-07-11	10:48	1,0
CO2_COL_G1_105	408	0,09	455660	8015049	4084	29-07-11	12:35	1,0
CO2_COL_G1_095	401	0,09	455576	8015484	4090	29-07-11	11:28	0,9
CO2_COL_G1_106	396	0,06	455659	8015020	4081	29-07-11	12:39	0,7
CO2_COL_G1_002	264594	1667,99	455696	8014707	4089	05-10-11	13:19	17153,7
CO2_COL_G1_001	59682	410,44	455696	8014716	4090	05-10-11	13:01	4247,2
CO2_COL_G1_007	26087	172,68	455576	8014764	4096	05-10-11	15:26	1756,0
CO2_COL_G1_003	4891	32,38	455684	8014720	4089	05-10-11	13:42	333,4
CO2_COL_G1_009	517	0,94	455572	8014689	4082	05-10-11	15:46	9,5
CO2_COL_G1_012	532	0,93	455583	8014572	4095	05-10-11	16:06	9,4
CO2_COL_G1_006	498	0,77	455642	8014710	4091	05-10-11	15:17	7,9
CO2_COL_G1_018	456	0,46	455641	8014527	4093	05-10-11	16:48	4,7
CO2_COL_G1_010	449	0,46	455557	8014671	4081	05-10-11	15:53	4,6
CO2_COL_G1_008	447	0,37	455547	8014723	4085	05-10-11	15:40	3,8
CO2_COL_G1_004	492	0,28	455691	8014704	4087	05-10-11	13:33	2,9
CO2_COL_G1_023	424	0,26	455652	8014595	4095	05-10-11	17:32	2,5
CO2_COL_G1_022	418	0,24	455678	8014626	4089	05-10-11	17:26	2,5
CO2_COL_G1_013	418	0,24	455586	8014510	4098	05-10-11	16:14	2,4
CO2_COL_G1_016	402	0,13	455648	8014464	4101	05-10-11	16:34	1,4
CO2_COL_G1_019	403	0,13	455632	8014558	4090	05-10-11	17:06	1,4
CO2_COL_G1_011	397	0,08	455570	8014635	4090	05-10-11	16:00	0,8
CO2_COL_G1_017	392	0,06	455623	8014484	4099	05-10-11	16:41	0,6
CO2_COL_G1_005	404	0,05	455707	8014672	4093	05-10-11	13:51	0,5
CO2_COL_G1_054	59333	456,33	455684	8014686	4089	06-10-11	14:47	4716,4
CO2_COL_G1_056	38211	270,55	455718	8014684	4087	06-10-11	15:05	2798,2
CO2_COL_G1_081	13457	90,00	455731	8014723	4096	06-10-11	17:46	940,2
CO2_COL_G1_050	8059	53,99	455759	8014565	4099	06-10-11	13:03	551,4
CO2_COL_G1_026	7829	50,92	455657	8014618	4090	06-10-11	9:29	537,7
CO2_COL_G1_044	8137	49,90	455760	8014459	4101	06-10-11	11:54	517,1
CO2_COL_G1_045	4924	30,52	455779	8014428	4104	06-10-11	12:36	312,9
CO2_COL_G1_043	2547	13,93	455754	8014432	4102	06-10-11	11:48	144,2
CO2_COL_G1_038	1294	6,20	455729	8014595	4097	06-10-11	11:20	62,7
CO2_COL_G1_036	849	3,29	455681	8014676	4086	06-10-11	11:02	34,4
CO2_COL_G1_078	701	2,27	455797	8014705	4100	06-10-11	17:33	23,6
CO2_COL_G1_053	519	0,96	455748	8014638	4098	06-10-11	13:22	9,9
CO2_COL_G1_031	514	0,89	455712	8014487	4097	06-10-11	10:09	9,4
CO2_COL_G1_057	573	0,84	455743	8014665	4092	06-10-11	15:15	8,7
CO2_COL_G1_030	507	0,72	455715	8014448	4096	06-10-11	10:04	7,6
CO2_COL_G1_047	489	0,73	455778	8014459	4105	06-10-11	12:49	7,5
CO2_COL_G1_028	479	0,63	455674	8014494	4093	06-10-11	9:49	6,7
CO2_COL_G1_077	474	0,62	455799	8014670	4101	06-10-11	17:28	6,4
CO2_COL_G1_072	458	0,59	455829	8014504	4104	06-10-11	17:00	6,1

CO2_COL_G1_055	495	0,57	455684	8014658	4091	06-10-11	14:59	5,9
CO2_COL_G1_059	460	0,50	455775	8014645	4090	06-10-11	15:27	5,2
CO2_COL_G1_035	451	0,47	455648	8014683	4082	06-10-11	10:38	4,9
CO2_COL_G1_029	446	0,43	455687	8014467	4093	06-10-11	9:55	4,5
CO2_COL_G1_039	447	0,42	455732	8014564	4098	06-10-11	11:28	4,3
CO2_COL_G1_048	428	0,30	455770	8014486	4102	06-10-11	12:53	3,1
CO2_COL_G1_049	422	0,28	455763	8014518	4103	06-10-11	12:58	2,9
CO2_COL_G1_063	472	0,24	455795	8014524	4093	06-10-11	15:49	2,5
CO2_COL_G1_064	421	0,23	455800	8014495	4097	06-10-11	15:56	2,4
CO2_COL_G1_068	416	0,23	455847	8014395	4101	06-10-11	16:16	2,3
CO2_COL_G1_060	422	0,19	455786	8014607	4089	06-10-11	15:33	2,0
CO2_COL_G1_070	404	0,19	455832	8014435	4097	06-10-11	16:28	1,9
CO2_COL_G1_080	403	0,16	455765	8014728	4097	06-10-11	17:42	1,7
CO2_COL_G1_027	412	0,11	455674	8014528	4093	06-10-11	9:44	1,1
CO2_COL_G1_033	401	0,11	455687	8014595	4091	06-10-11	10:25	1,1
CO2_COL_G1_079	400	0,10	455791	8014735	4097	06-10-11	17:38	1,1
CO2_COL_G1_046	411	0,10	455783	8014397	4108	06-10-11	12:43	1,0
CO2_COL_G1_042	396	0,09	455745	8014478	4101	06-10-11	11:43	1,0
CO2_COL_G1_034	403	0,09	455663	8014630	4091	06-10-11	10:32	0,9
CO2_COL_G1_037	392	0,08	455725	8014627	4090	06-10-11	11:14	0,8
CO2_COL_G1_040	393	0,07	455737	8014532	4097	06-10-11	11:33	0,8
CO2_COL_G1_069	395	0,07	455837	8014427	4100	06-10-11	16:23	0,7
CO2_COL_G1_066	394	0,07	455804	8014433	4100	06-10-11	16:06	0,7
CO2_COL_G1_067	392	0,06	455812	8014397	4104	06-10-11	16:11	0,6
CO2_COL_G1_041	391	0,05	455743	8014504	4103	06-10-11	11:38	0,5
CO2_COL_G1_074	390	0,05	455825	8014559	4100	06-10-11	17:11	0,5
CO2_COL_G1_052	394	0,04	455749	8014608	4096	06-10-11	13:18	0,5
CO2_COL_G1_113	400279	2602,70	455752	8014764	4095	07-10-11	13:28	26903,4
CO2_COL_G1_125	98854	719,30	455716	8014807	4085	07-10-11	16:24	7425,4
CO2_COL_G1_138	16406	432,10	455678	8014764	4089	07-10-11	17:56	4513,5
CO2_COL_G1_124	60436	434,41	455711	8014824	4091	07-10-11	15:59	4504,6
CO2_COL_G1_123	46304	314,84	455706	8014837	4089	07-10-11	15:46	3253,4
CO2_COL_G1_129	12798	303,75	455687	8014858	4094	07-10-11	16:55	3140,1
CO2_COL_G1_130	10836	243,29	455698	8014863	4093	07-10-11	17:00	2522,6
CO2_COL_G1_137	7299	99,73	455660	8014763	4088	07-10-11	17:50	1043,1
CO2_COL_G1_119	11990	68,93	455719	8014926	4093	07-10-11	15:22	709,4
CO2_COL_G1_131	1329	6,68	455690	8014901	4091	07-10-11	17:05	69,4
CO2_COL_G1_126	657	2,20	455735	8014787	4091	07-10-11	16:39	22,8
CO2_COL_G1_108	494	0,97	455731	8014959	4094	07-10-11	12:54	10,0
CO2_COL_G1_120	510	0,92	455698	8014919	4089	07-10-11	15:32	9,5
CO2_COL_G1_110	459	0,82	455808	8014857	4108	07-10-11	13:07	8,5
CO2_COL_G1_101	498	0,78	455856	8014756	4106	07-10-11	12:11	8,1
CO2_COL_G1_099	489	0,68	455859	8014720	4103	07-10-11	11:33	7,1
CO2_COL_G1_107	464	0,66	455721	8015020	4095	07-10-11	12:49	6,8
CO2_COL_G1_135	461	0,64	455663	8014785	4091	07-10-11	17:27	6,7

CO2_COL_G1_121	460	0,62	455710	8014884	4088	07-10-11	15:38	6,4
CO2_COL_G1_133	475	0,60	455664	8014886	4091	07-10-11	17:16	6,3
CO2_COL_G1_114	481	0,56	455785	8014764	4091	07-10-11	14:54	5,7
CO2_COL_G1_089	458	0,51	455866	8014469	4101	07-10-11	10:33	5,3
CO2_COL_G1_093	443	0,43	455900	8014441	4109	07-10-11	10:59	4,5
CO2_COL_G1_098	450	0,41	455866	8014685	4105	07-10-11	11:26	4,3
CO2_COL_G1_111	433	0,40	455812	8014795	4101	07-10-11	13:17	4,1
CO2_COL_G1_100	431	0,39	455826	8014732	4099	07-10-11	12:06	4,1
CO2_COL_G1_082	437	0,29	455834	8014703	4090	07-10-11	9:45	3,1
CO2_COL_G1_087	429	0,29	455855	8014527	4097	07-10-11	10:23	3,0
CO2_COL_G1_086	420	0,24	455849	8014553	4094	07-10-11	10:17	2,5
CO2_COL_G1_117	414	0,23	455737	8014881	4093	07-10-11	15:11	2,4
CO2_COL_G1_083	415	0,21	455839	8014673	4093	07-10-11	9:54	2,2
CO2_COL_G1_118	410	0,18	455736	8014922	4090	07-10-11	15:16	1,8
CO2_COL_G1_116	409	0,16	455747	8014852	4089	07-10-11	15:06	1,6
CO2_COL_G1_102	407	0,16	455841	8014827	4105	07-10-11	12:17	1,6
CO2_COL_G1_088	405	0,15	455862	8014498	4099	07-10-11	10:28	1,5
CO2_COL_G1_091	406	0,14	455870	8014410	4100	07-10-11	10:44	1,4
CO2_COL_G1_095	402	0,13	455872	8014517	4094	07-10-11	11:09	1,4
CO2_COL_G1_105	398	0,11	455757	8014992	4097	07-10-11	12:37	1,1
CO2_COL_G1_134	398	0,10	455658	8014837	4088	07-10-11	17:22	1,1
CO2_COL_G1_132	406	0,10	455669	8014915	4093	07-10-11	17:11	1,1
CO2_COL_G1_090	400	0,09	455873	8014437	4099	07-10-11	10:39	1,0
CO2_COL_G1_096	398	0,08	455870	8014571	4099	07-10-11	11:14	0,9
CO2_COL_G1_127	406	0,08	455700	8014768	4093	07-10-11	16:44	0,8
CO2_COL_G1_112	396	0,08	455779	8014793	4094	07-10-11	13:22	0,8
CO2_COL_G1_109	390	0,07	455771	8014915	4102	07-10-11	13:01	0,8
CO2_COL_G1_103	394	0,07	455830	8014892	4103	07-10-11	12:25	0,7
CO2_COL_G1_092	395	0,07	455898	8014406	4101	07-10-11	10:52	0,7
CO2_COL_G1_115	401	0,06	455746	8014802	4092	07-10-11	15:01	0,7
CO2_COL_G1_094	394	0,06	455884	8014489	4106	07-10-11	11:04	0,7
CO2_COL_G1_122	395	0,06	455716	8014868	4090	07-10-11	15:42	0,6
CO2_COL_G1_097	392	0,05	455871	8014642	4103	07-10-11	11:20	0,6
CO2_COL_G1_128	400	0,05	455685	8014807	4093	07-10-11	16:49	0,5
CO2_COL_G1_169	25961	1255,54	455501	8014654	4086	08-10-11	12:58	13023,8
CO2_COL_G1_174	18253	832,81	455528	8014683	4092	08-10-11	13:40	8640,1
CO2_COL_G1_187	19156	565,61	455582	8015172	4076	08-10-11	16:31	5807,0
CO2_COL_G1_170	20573	452,69	455490	8014658	4081	08-10-11	13:08	4699,3
CO2_COL_G1_168	14242	253,09	455511	8014666	4083	08-10-11	12:50	2626,8
CO2_COL_G1_173	6282	86,01	455494	8014686	4082	08-10-11	13:23	894,3
CO2_COL_G1_186	7662	62,97	455534	8015173	4078	08-10-11	16:24	649,0
CO2_COL_G1_188	4828	38,56	455624	8015181	4081	08-10-11	16:37	395,9
CO2_COL_G1_182	3678	25,52	455475	8015119	4078	08-10-11	15:58	262,9
CO2_COL_G1_195	3225	23,47	455466	8015246	4084	08-10-11	17:14	242,9
CO2_COL_G1_142	1681	10,65	455632	8014769	4090	08-10-11	10:07	111,8

CO2_COL_G1_185	1365	8,54	455500	8015168	4075	08-10-11	16:19	87,7
CO2_COL_G1_191	823	3,67	455515	8015187	4086	08-10-11	16:55	38,0
CO2_COL_G1_145	839	3,62	455629	8014883	4087	08-10-11	10:24	37,8
CO2_COL_G1_178	791	3,34	455572	8015085	4081	08-10-11	15:35	34,3
CO2_COL_G1_143	765	2,98	455634	8014799	4086	08-10-11	10:14	31,2
CO2_COL_G1_149	667	2,42	455639	8014955	4082	08-10-11	10:46	25,4
CO2_COL_G1_147	652	2,09	455650	8014929	4087	08-10-11	10:37	21,9
CO2_COL_G1_146	598	1,61	455629	8014894	4090	08-10-11	10:29	16,9
CO2_COL_G1_196	562	1,49	455443	8015254	4081	08-10-11	17:19	15,5
CO2_COL_G1_153	507	1,04	455594	8014877	4088	08-10-11	11:08	10,8
CO2_COL_G1_180	507	0,97	455591	8015130	4079	08-10-11	15:46	9,9
CO2_COL_G1_190	511	0,96	455545	8015202	4085	08-10-11	16:50	9,8
CO2_COL_G1_167	504	0,85	455543	8014638	4093	08-10-11	12:43	8,8
CO2_COL_G1_140	467	0,82	455625	8014722	4086	08-10-11	9:57	8,7
CO2_COL_G1_198	450	0,59	455467	8015314	4084	08-10-11	17:28	6,1
CO2_COL_G1_154	446	0,54	455602	8014846	4089	08-10-11	11:14	5,6
CO2_COL_G1_144	451	0,50	455628	8014833	4089	08-10-11	10:19	5,2
CO2_COL_G1_163	439	0,47	455524	8014928	4091	08-10-11	12:21	4,9
CO2_COL_G1_193	441	0,45	455467	8015180	4084	08-10-11	17:04	4,6
CO2_COL_G1_141	451	0,44	455642	8014732	4085	08-10-11	10:02	4,6
CO2_COL_G1_192	435	0,44	455480	8015193	4085	08-10-11	17:00	4,5
CO2_COL_G1_139	463	0,42	455590	8014723	4088	08-10-11	9:49	4,4
CO2_COL_G1_203	428	0,34	455375	8015128	4077	08-10-11	17:55	3,6
CO2_COL_G1_158	429	0,34	455575	8014794	4095	08-10-11	11:57	3,6
CO2_COL_G1_184	422	0,34	455470	8015165	4075	08-10-11	16:12	3,5
CO2_COL_G1_200	420	0,32	455421	8015313	4080	08-10-11	17:38	3,4
CO2_COL_G1_202	423	0,32	455381	8015159	4078	08-10-11	17:50	3,4
CO2_COL_G1_151	417	0,29	455615	8014920	4083	08-10-11	10:57	3,1
CO2_COL_G1_166	420	0,29	455549	8014750	4092	08-10-11	12:36	3,0
CO2_COL_G1_199	415	0,26	455444	8015373	4081	08-10-11	17:33	2,7
CO2_COL_G1_156	414	0,24	455606	8014762	4091	08-10-11	11:24	2,5
CO2_COL_G1_179	407	0,21	455565	8015119	4079	08-10-11	15:40	2,1
CO2_COL_G1_162	407	0,19	455549	8014965	4086	08-10-11	12:16	1,9
CO2_COL_G1_194	407	0,18	455452	8015219	4081	08-10-11	17:09	1,9
CO2_COL_G1_189	416	0,18	455573	8015208	4087	08-10-11	16:45	1,8
CO2_COL_G1_157	403	0,17	455581	8014689	4084	08-10-11	11:31	1,8
CO2_COL_G1_181	403	0,17	455490	8015123	4080	08-10-11	15:53	1,7
CO2_COL_G1_150	401	0,14	455608	8014972	4084	08-10-11	10:51	1,5
CO2_COL_G1_155	404	0,14	455605	8014786	4088	08-10-11	11:19	1,5
CO2_COL_G1_171	426	0,13	455455	8014656	4081	08-10-11	13:13	1,4
CO2_COL_G1_148	403	0,13	455662	8014962	4084	08-10-11	10:41	1,4
CO2_COL_G1_201	397	0,12	455385	8015257	4071	08-10-11	17:43	1,3
CO2_COL_G1_183	405	0,13	455453	8015147	4078	08-10-11	16:06	1,3
CO2_COL_G1_175	399	0,12	455525	8014994	4069	08-10-11	15:14	1,2
CO2_COL_G1_159	395	0,08	455570	8014821	4094	08-10-11	12:01	0,9

CO2_COL_G1_165	391	0,08	455545	8014811	4100	08-10-11	12:31	0,8
CO2_COL_G1_160	391	0,08	455563	8014855	4096	08-10-11	12:05	0,8
CO2_COL_G1_177	401	0,07	455540	8015083	4081	08-10-11	15:31	0,8
CO2_COL_G1_152	390	0,07	455583	8014943	4084	08-10-11	11:02	0,7
CO2_COL_G1_161	390	0,07	455557	8014910	4091	08-10-11	12:10	0,7
CO2_COL_G1_164	390	0,06	455524	8014866	4095	08-10-11	12:26	0,6
CO2_COL_G1_207	40537	907,57	455414	8015022	4076	09-10-11	10:05	9585,1
CO2_COL_G1_237	54145	675,33	455642	8015153	4078	09-10-11	16:41	7064,7
CO2_COL_G1_206	22543	487,45	455410	8015026	4078	09-10-11	9:53	5140,0
CO2_COL_G1_236	23856	488,81	455659	8015155	4073	09-10-11	16:18	5089,2
CO2_COL_G1_212	20361	438,94	455224	8015081	4076	09-10-11	12:09	4608,3
CO2_COL_G1_211	16415	378,02	455246	8015094	4069	09-10-11	11:42	3961,9
CO2_COL_G1_214	12249	122,64	455581	8015171	4079	09-10-11	12:52	1291,7
CO2_COL_G1_204	7432	100,60	455393	8015032	4080	09-10-11	9:25	1054,6
CO2_COL_G1_205	6916	77,88	455400	8015030	4078	09-10-11	9:37	817,9
CO2_COL_G1_213	5076	62,51	455452	8015127	4080	09-10-11	12:38	648,3
CO2_COL_G1_218	4878	62,22	455629	8015326	4086	09-10-11	14:51	642,1
CO2_COL_G1_238	7139	50,31	455619	8015133	4082	09-10-11	16:51	521,3
CO2_COL_G1_217	1481	9,03	455594	8015338	4096	09-10-11	13:13	94,4
CO2_COL_G1_239	947	5,06	455614	8015157	4080	09-10-11	16:59	52,5
CO2_COL_G1_215	598	2,31	455602	8015242	4096	09-10-11	13:03	24,2
CO2_COL_G1_231	584	1,67	455696	8015175	4086	09-10-11	15:53	17,5
CO2_COL_G1_229	509	1,30	455690	8015256	4094	09-10-11	15:43	13,5
CO2_COL_G1_220	528	1,22	455654	8015356	4094	09-10-11	15:04	12,6
CO2_COL_G1_216	488	1,09	455599	8015281	4095	09-10-11	13:07	11,4
CO2_COL_G1_222	488	1,04	455645	8015417	4096	09-10-11	15:12	10,8
CO2_COL_G1_230	449	0,65	455692	8015231	4090	09-10-11	15:47	6,7
CO2_COL_G1_240	457	0,63	455685	8015075	4087	09-10-11	17:08	6,6
CO2_COL_G1_219	466	0,63	455651	8015307	4098	09-10-11	14:59	6,4
CO2_COL_G1_233	439	0,61	455713	8015108	4076	09-10-11	16:03	6,4
CO2_COL_G1_210	448	0,41	455247	8015099	4073	09-10-11	11:33	4,3
CO2_COL_G1_221	429	0,38	455646	8015385	4093	09-10-11	15:08	3,9
CO2_COL_G1_235	431	0,37	455669	8015129	4076	09-10-11	16:12	3,9
CO2_COL_G1_234	412	0,30	455688	8015115	4076	09-10-11	16:08	3,1
CO2_COL_G1_242	402	0,17	455752	8015063	4082	09-10-11	17:23	1,7
CO2_COL_G1_245	396	0,14	455489	8015087	4084	09-10-11	17:50	1,5
CO2_COL_G1_227	394	0,14	455676	8015377	4093	09-10-11	15:34	1,5
CO2_COL_G1_228	394	0,13	455677	8015322	4095	09-10-11	15:39	1,4
CO2_COL_G1_244	391	0,08	455527	8015104	4083	09-10-11	17:46	0,9
CO2_COL_G1_223	388	0,07	455626	8015468	4096	09-10-11	15:17	0,7
CO2_COL_G1_249	4374	32,65	455510	8015384	4085	10-10-11	9:34	346,0
CO2_COL_G1_276	1027	5,49	455560	8015298	4092	10-10-11	12:30	56,9
CO2_COL_G1_277	772	3,49	455535	8015264	4087	10-10-11	12:34	36,1
CO2_COL_G1_269	596	1,78	455726	8015152	4083	10-10-11	11:45	18,5
CO2_COL_G1_268	556	1,46	455733	8015177	4089	10-10-11	11:38	15,2

CO2_COL_G1_246	510	1,08	455513	8015223	4079	10-10-11	9:17	11,3
CO2_COL_G1_252	479	0,87	455468	8015456	4083	10-10-11	9:52	9,2
CO2_COL_G1_275	468	0,87	455554	8015233	4088	10-10-11	12:26	9,1
CO2_COL_G1_248	483	0,82	455531	8015323	4085	10-10-11	9:27	8,7
CO2_COL_G1_250	480	0,69	455511	8015418	4083	10-10-11	9:42	7,2
CO2_COL_G1_247	451	0,54	455503	8015292	4084	10-10-11	9:21	5,8
CO2_COL_G1_265	438	0,50	455729	8015232	4092	10-10-11	11:26	5,2
CO2_COL_G1_267	430	0,44	455729	8015207	4091	10-10-11	11:34	4,6
CO2_COL_G1_254	412	0,24	455469	8015418	4078	10-10-11	10:14	2,6
CO2_COL_G1_256	399	0,18	455533	8015547	4079	10-10-11	10:40	1,9
CO2_COL_G1_251	401	0,15	455502	8015446	4088	10-10-11	9:46	1,6
CO2_COL_G1_278	435	0,38	455410	455410	4080	10-10-11	12:43	1,2
CO2_COL_G1_271	389	0,11	455743	8015120	4084	10-10-11	11:54	1,2
CO2_COL_G1_253	393	0,11	455467	8015483	4084	10-10-11	10:07	1,2
CO2_COL_G1_259	431	0,11	455729	8015447	4086	10-10-11	10:57	1,1
CO2_COL_G1_273	391	0,10	455811	8015055	4090	10-10-11	12:03	1,1
CO2_COL_G1_262	394	0,10	455711	8015352	4093	10-10-11	11:11	1,1
CO2_COL_G1_258	394	0,10	455696	8015470	4090	10-10-11	10:52	1,0
CO2_COL_G1_263	439	0,10	455714	8015293	4095	10-10-11	11:16	1,0
CO2_COL_G1_261	393	0,09	455740	8015398	4091	10-10-11	11:07	1,0
CO2_COL_G1_272	390	0,07	455772	8015096	4085	10-10-11	11:58	0,8
CO2_COL_G1_260	452	0,07	455700	8015427	4088	10-10-11	11:02	0,8
CO2_COL_G1_266	390	0,07	455762	8015212	4096	10-10-11	11:30	0,7
CO2_COL_G1_264	388	0,06	455756	8015270	4100	10-10-11	11:21	0,7

ROCAS ESTRATIFICADAS

PLIOCENO - HOLOCENO

- PIHa Depósitos aluviales (Pleistoceno - Holoceno)**
 Depósitos no consolidados que forman los cauces recientes de quebradas y valles de escorrentía intermitente.
- PIHac Depósitos aluviales y coluviales (Pleistoceno - Holoceno)**
 Depósitos de limo, arena y gravas no consolidados, que constituyen los cauces, conos de deyección y relleno de valles y quebradas recientes. Corresponden a depósitos polimícticos a monomícticos (depósitos de relleno de quebradas y coluvio con poco transporte), mal seleccionados y pobremente estratificados.
- PIHc Depósitos coluviales (Pleistoceno - Holoceno)**
 Fragmentos sueltos, principalmente angulosos, que se disponen en la falda de los cerros y rellenando quebradas, con poco transporte, esencialmente gravitacional.
- PIHd Depósitos de dunas (Pleistoceno - Holoceno)**
 Sin descripción (estructuras tipo tafoni?).
- PIHg Depósitos glaciares (Pleistoceno - Holoceno)**
 Brechas polimícticas a monomícticas no consolidadas, constituidas esencialmente por fragmentos de dacitas y andesitas de tamaño variable y angularidad creciente con el tamaño, inmersos en una matriz de limo-arena. Se incluye los depósitos periglaciares reconocidos en la base de flancos abruptos de domos y volcanes.
- PIHi Depósitos lacustres (Pleistoceno - Holoceno)**
 Corresponden a depósitos de arenas, limos y gravas finos de borde de lago, moderada a fuertemente consolidados que se disponen horizontales a subhorizontales. Los fragmentos están constituidos básicamente por andesitas, dacitas y fragmentos piroclásticos pumíceos muy redondeados y bien seleccionados, formando capas bien laminadas, algunas con laminación cruzada y lentes de arena fina.
- PIHrm Depósitos de remoción en masa (Pleistoceno - Holoceno)**
 Corresponden a depósitos de arenas, limos y gravas finos de borde de lago, moderada a fuertemente consolidados que se disponen horizontales a subhorizontales. Los fragmentos están constituidos básicamente por andesitas, dacitas y fragmentos piroclásticos pumíceos muy redondeados y bien seleccionados, formando capas bien laminadas, algunas con laminación cruzada y lentes de arena fina.
- PIHs Depósitos salinos (Pleistoceno - Holoceno)**
 Depósitos de sales de origen evaporítico, constituidos esencialmente por cloruros y, en menor proporción por sulfatos y boratos. Forman costras salinas fácilmente disgregables de poco espesor en los bordes de las lagunas y salares del sector.
- PPlac Depósitos aluviales y coluviales indiferenciados (Plioceno - Pleistoceno)**
 Depósitos de escombros de falda de cerros, conos de deyección y relleno de quebradas y valles, polimícticos, mal seleccionados, y de baja madurez, con fragmentos de hasta 1 m de diámetro inmersos en una matriz de arena gruesa. Su superficie se presenta suavizada por la erosión y, en los valles, se presentan suavemente peniplanizados. Se presentan disecados o cubiertos por los cauces y conos de deyección recientes.
- PPIs Depósitos de paleosalar (Plioceno - Pleistoceno)**
 Secuencia de depósitos de yeso con cristales de hasta 30 cm de largo y, en menor proporción, de ulexita intercalados con niveles terrígenos y piroclásticos finos. Se disponen horizontales en los bordes nororiental y noroccidental del Salar de Piedra Parada, con un espesor máximo expuesto de 25 m.
- Pa Depósitos aluviales antiguos (Plioceno)**
 Depósitos de gravas aterrazadas polimícticas de origen esencialmente aluvional, de hasta 8 m de espesor. Presentan una superficie suave y, en sectores, se encuentran afectadas por suaves pliegues y fallas normales. Están constituidos principalmente por fragmentos de origen volcánico y, en menor proporción, del basamento, subredondeados, inmersos en una matriz arenosa, la cual presenta habitualmente rasgos de laminación paralela y, en sectores, cruzada.

EOCENO - MIOCENO

- Misa**  **Estratos de Sierra de Aliste** **20,7 ± 0,8; 20,2 ± 1,7; 18,5 ± 1,1; 18,0 ± 1,7 y 17,5 ± 1,1 Ma (Mioceno inferior; Clavero et al., 1998)**
 Secuencia volcánica y sedimentaria, continental, constituida por una sucesión de depósitos de bloques y ceniza, que localmente muestra una reducida intercalación sedimentaria de rocas clásticas y lacustres, hacia el techo de la secuencia. Se encuentra intensa a moderadamente plegada, en particular los niveles lacustres y cortada por numerosas fallas de rumbo NS. Se dispone de 5 edades K-Ar en roca total de dacitas de depósitos de bloques y ceniza de esta unidad, siendo las más consistente las de 20,7 ± 0,8 y 20,2 ± 1,7 Ma. Las restantes edades han sido interpretadas como valores mínimos.
- Misa(a)**  Facies volcánica: sucesión de depósitos de flujos piroclástico de bloques y ceniza, constituidos por bloques de dacitas inmersos en una matriz mediana a débilmente soldada de fragmentos menores de la misma composición que los bloques y de cristales. Muestran vesicularidad variable, frecuentemente bandeamiento de flujo y ocasionalmente, diaclasamiento prismático y estructuras de corteza de pan.
- Misa(b)**  Facies sedimentaria clástica: gravas, conglomerados y niveles más finos, bien estratificados, medianamente a bien consolidados, con escasos lentes carbonatados. En forma subordinada afloran areniscas y lutitas, comúnmente rojas. Corresponden a depósitos polimícticos, con fragmentos subangulares a redondeados, principalmente de dacitas de los depósitos de bloques y ceniza, andesitas negras, pórfidos de hornblenda y, de tobas soldadas, pórfidos y granitoides del Permo-Triásico.
- OMrj**  **Estratos del Río Juncalito** **24,2 ± 0,8; 23,5 ± 1,0; 23,5 ± 1,5 y 22,0 ± 0,9 Ma (Oligoceno superior - Mioceno inferior; Clavero et al., 1998)**
 Secuencia volcanoclástica de entre 2 y 300 m de espesor, suavemente plegada y constituida por al menos dos asociaciones de facies. Se ha obtenido cuatro edades K/Ar en biotita y en roca total, comprendidas entre 24,2 y 22 Ma.
- OMrj(a)**  Facies volcanoclástica: secuencia de 50 a 150 m de espesor, formada por ignimbritas dacíticas a riolíticas y depósitos aluviales. Las ignimbritas presentan una compactación media, sin soldamiento, y están constituidas principalmente por fragmentos pumíceos tamaño lapilli grueso a ceniza, abundantes fragmentos líticos que no superan el tamaño de pequeños bloques, inmersos en una matriz de ceniza fina blanca a amarilla. Los depósitos aluviales están constituidos por bloques de las mismas ignimbritas y rocas del basamento, inmersos de manera caótica en una matriz arenosa y arcillosa fina.
- OMrj(b)**  Facies sedimentaria: secuencia de hasta 20 m de espesor, subhorizontal y, en sectores, fuertemente plegada, constituida principalmente por calizas blancas y amarillas, muy compactas, de granulometría fina, con intercalaciones de niveles más ricos en material terrígeno, de menor grado de compactación y tonalidad parda. en capas de similar espesor

PALEZOICO - TRIÁSICO

- PTrp**  **Formación Pantanoso (Pérmico - Triásico; Mercado, 1982)**
 Secuencia volcanoclástica y subvolcánica conformada por riolitas y riolíticas a veces fluidales, tobas riolíticas comúnmente soldadas, rojas, ricas en ojos de cuarzo, de estratificación gruesa, muchas veces no identificable, y brechas piroclásticas gruesas riolíticas, con escasas intercalaciones de lavas y cuerpos subvolcánicos basálticos y de areniscas, conglomerados y brechas epiclásticas, generalmente de tonalidad rojiza. Gardeweg et al. (1997) reportan una edad K/Ar de 228 ± 5 Ma para una toba riolítica de esta unidad, lo que indica una edad mínima triásica. Por otra parte, la edad pérmica de los pórfidos y granitos que la intruyen, permite inferir que la edad de la secuencia sería más bien triásica.
- PTrp(a)**  Lavas y cuerpos subvolcánicos basálticos.

PLIOCENO - HOLOCENO

Complejos volcánicos y estratovolcanes recientes (Pleistoceno - Holoceno)

Centros de emisión, lavas, domos y depósitos piroclásticos de flujo y caída, los que presentan morfologías primarias como levées, canales centrales, lóbulos de avance, en general, muy bien conservadas. Petrográficamente corresponden a andesitas de clinopiroxeno y/u ortopiroxeno, ricas en fenocristales de plagioclasa en masas fundamentales pilotaxíticas a vítreas frescas y dacitas de hornblenda y/o biotita y/o clinopiroxeno en masas fundamentales habitualmente fluidales. Es común la presencia de xenocristales de olivino e inclusiones máficas en estas últimas. Se ha obtenido numerosas edades radiométricas K-Ar y Ar-Ar comprendidas entre 1,6 y 0,18 Ma (Clavero et al., 1997 y 1998; Naranjo y Comejo, 1992).

- PIHv(a) Predominantemente lavas.

- PIHv(b) Domos.

- PIHv(c) Depósitos de bloques y ceniza.

- PIHv(d) Depósito de caída pumiceo.

- PIHv(e) Depósito de bloques y ceniza del volcán Fraile.

- PIHv(f) Depósito de avalancha volcánica.

- PIHv(g) Depósitos de caída proximal.

- PIHv(h) Depósitos laháricos del volcán Falso Azufre.

- PIHv(i) Conos de piroclastos y lavas asociadas.


Complejos volcánicos y estratovolcanes del Plioceno superior (Plioceno superior)

Conjunto de volcanes con productos de composición principalmente andesítica y, en menor proporción, dacítica y riolítica. Es común que constituyan parte del basamento de los edificios volcánicos recientes. Están constituidos principalmente por lavas, andesíticas a dacíticas, con superficies suavizadas por la erosión, las que conservan aún ciertos rasgos primarios y, en menor proporción, riolíticas. Afloran también lavas basálticas, depósitos de caída proximales y depósitos de flujo de detritos volcánicos. Se ha obtenido 20 dataciones radiométricas K-Ar comprendidas entre $1,7 \pm 0,5$ y $3,5 \pm 0,7$ Ma, para diversos productos de estos edificios (Clavero et al., 1997 y 1998).

- Psv(a) Predominantemente lavas.

- Psv(b) Depósito de flujo de detritos volcánicos.

- Psv(c) Depósitos piroclásticos de caída proximal.

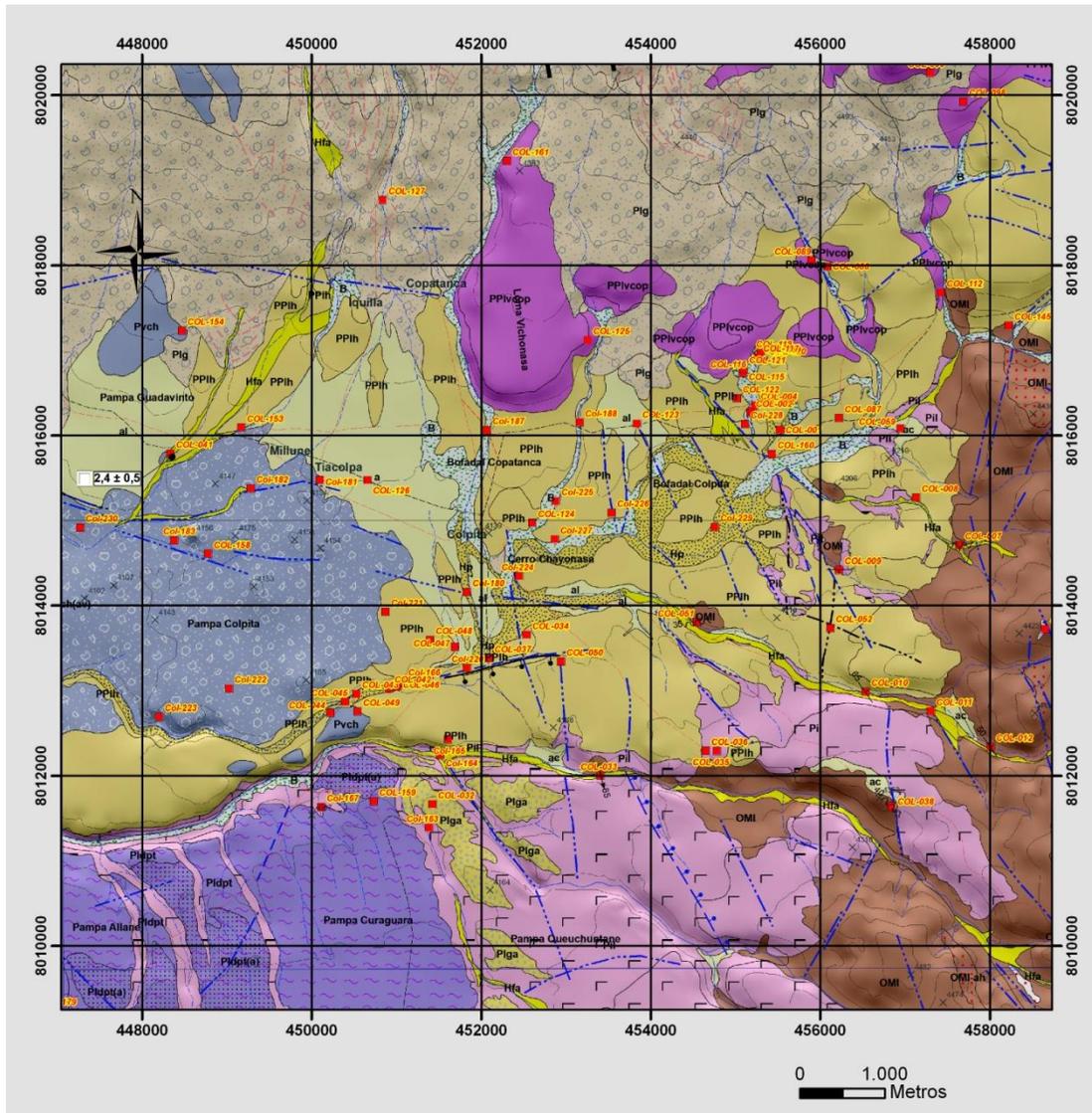
- Psv(d) Lava riolítica.

- Psv(e) Domos dacíticos.

- Psv(f) Depósitos de flujo piroclástico.


B.2. Geología Colpitas

Mapa geológico local de la zona de Colpitas (extraído y modificado de de mapa geológico realizado por AURUM para EASA, escala 1:100000, 2011).



LEYENDA MAPA GEOLÓGICO

ROCAS SEDIMENTARIAS

	Hfa	Depósitos fluvio-aluviales (Holoceno) Gravas, rípios, arenas y limos polimicticos, mal seleccionados y no consolidados, de distribución restringida, asociados a sistemas de drenaje sólo activos ocasionalmente en temporada de lluvias.
	Hp	Depósitos palustres (Holoceno) Depósitos de limos y turba, no consolidados a débilmente consolidados, de estratificación fina a laminada, con intercalaciones de niveles clásticos gruesos (gravas). Parcialmente cubiertos por botadales. Localmente incluye depósitos salinos y travertinos.
	Hrm	Depósitos de remoción en masa
	ac, a, c, al	Depósitos aluvial-coluviales (Holoceno) Gravas, rípios, arenas y limos polimicticos, no consolidados, que forman pequeños abanicos sobre y entre coladas de lavas.
	Pig	Depósitos glaciales (Pleistoceno) Extensos mantos de till o morenas de fondo, constituidos por depósitos detriticos no consolidados, mal seleccionados y masivos, de bolones, gravas y rípios en abundante matriz de arena, limo y arcillas, de origen glacial. Forman lanuras onduladas con cordones morrénicos arqueados y lóbulos principalmente en los flancos medio e inferiores de los volcanes Churicagua, Chuquiananta, Copatanca y Cosapilla.
	PPIh	Formación Huaylas (Plioceno-Pleistoceno) Salas et al. (1966) Secuencia sedimentaria clásica moderada a débilmente consolidada de gravas polimicticas mal seleccionadas y arenas fluviales, con intercalaciones de tobas no soldadas, brechas volcánicas y depósitos de bloques y cenizas provenientes de los volcanes Copatanca, Cosapilla y Churicagua. Superficie frecuentemente constituida por acumulaciones de bloques de lavas en matriz arenosa producto del retrabajo aluvial o lahárico de brechas volcánicas y depósitos de bloque y cenizas. Localmente incluye intercalaciones de gravas. Estratificación inopiente y disecada por depósitos aluviales y fluviales recientes. Los afloramientos más distales tienen disposición de terraza.
	Pli	Ignimbrita Lauca (Plioceno, 2,6-2,8 Ma) Toba riolítica, leve a moderadamente soldada, de vidrio y cristales (plagioclasa, biotita, cuarzo y sanidina, -anfíbola y magnetita) con proporciones variables de pómez y líticos.
	OMI	Formación Lupica (Oligoceno superior-Mioceno inferior) Sucesión volcánica con intercalaciones sedimentarias, continental fuertemente plegada. En el área de estudio está constituida, predominantemente, por andesitas verdes y pardas oscuras y en forma subordinada por tobas de vidrio y cristales soldadas (ignimbritas) con escasas intercalaciones de sedimentitas finas. a) Predominio de lavas andesíticas, subordinadamente dacíticas, con escasas brechas volcánicas. b) Predominio de tobas de vidrio y cristales, soldadas. c) Niveles sedimentarios

ROCAS VOLCÁNICAS

	Pisd	Domos Portozuelo Suriplaza
	Pldp	Depósitos Piroclásticos del Vn. Taapaca (Pleistoceno Inferior a Medio; 1,6-0,5 Ma) Clavero y Sparks (2005). Secuencia de depósitos de bloques y cenizas de hasta 20 m de espesor, extensamente distribuida en el flanco norte del Complejo Volcánico Taapaca, donde forman abanicos de inclinación suave (xx°), con superficies suavizadas por erosión aluvial y parcialmente cubiertas por depósitos aluviales. Depósitos individuales de entre 2 y 20 m de espesor, formados por bloques moromicticos de dacitas porfídicas de biotita-hornblenda, de grano grueso, frecuentemente con diaclasamiento prismático, ameros en una matriz fina de cristales y fragmentos menores de los bloques, tamaño ceniza fina a media. (a) Depósitos aluviales poco potentes cubriendo depósitos de bloques y cenizas del Vn. Taapaca
	(a)	
	PPlvos Vn. Cosapilla	
	(a)	(a) Depósitos de bloques y cenizas
	PPlvocp Vn. Copatanca	
	Pvchq Vn. Chuquiananta	
		(g) Lavas parcialmente cubiertas por depósitos glaciales.
	Pvch Vn. Churicagua	
	(av) (av)	Depósito de Avalancha
		(g) Lavas parcialmente cubiertas por depósitos glaciales.
	Mav	Conjunto de volcanes del Mioceno superior 9,8-7,7 Ma
	Mpc	Porfido Colpitas-Pacocagua Mioceno medio -13,3 Ma
	ah	Zonas de alteración hidrotermal
	B	
	Ha	
	Hac	
	Hi	
	Pg	
	Piga	
	Pvch(m)	
	Pvchq(m)	

SIMBOLOGÍA

	Falla observada		Estratificación
	Falla inferida		Diaclasas
	Falla normal		Lajamiento
	Lineamiento		Dirección de flujo
	Escarpe de erosión		Observaciones puntuales de terreno (Aurum, 2011)
	Frente de colada		
	Cráter		
	Estrías y dirección de flujo en coladas		
	Levée		
	Cordones morrénicos		
	Estratos en coladas		
	Circo Glacial		
	Centros de emisión alineados		

Nota: Estructuras en azul corresponden a elementos fotointerpretados

EDADES RADIOMÉTRICAS

1	2	3
■	36,2	+5,3 1

1: Método
2: Edad en millones de años (Ma)
3: Fuente de la información

Dataciones Ar-Ar

 Ar-Ar, Feldespato
 Ar-Ar, Sanidina

Dataciones K-Ar

 K-Ar, Biotita
 K-Ar, Roca total

Información Topográfica

	Cota
	Curva nivel
	Camino pavimentado
	Camino de tierra
	Sendero
	Quebrada
	Localidad
	Area de concesión