



UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Escuela de pregrado

Escuela de Geografía

**ANALISIS DEL FENÓMENO DE PARDEAMIENTO FOLIAR Y
SU RELACIÓN CON EL PROCESO
DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DURANTE LOS EVENTOS
EXTREMOS DE CALOR DEL PERIODO ESTIVAL 2019-2020
EN EL PARQUE NACIONAL RÍO CLARILLO**

Memoria para optar al título de Geógrafo

ALFONSO ROBLEDO VALENZUELA

Profesor Guía: Pablo Sarricolea

SANTIAGO – CHILE

2021

Agradecimientos

Me honra dar mis agradecimientos a las personas que han estado conmigo en este y en todos los ciclos. A mí madre por ser mi más grande arcoíris por siempre. A mí familia por ser las personas que están en mi corazón, con esto incluyo a esas amistades que trascienden el espacio tiempo y con ello toda clase de frontera. Al Glorioso Rayo Vallacaño Antifascista y toda su gente.

“El agua es la vida del territorio”

Álvaro Escobar, presidente unión comunal de APR Petorca

RESUMEN

El bosque esclerófilo se caracteriza por estar presente en la zona mediterránea de Chile central, este se caracteriza por ser resistente ante las sequías y a las altas temperaturas. Sin embargo, esa zona atraviesa un periodo de sequía que se ha prolongado por los últimos diez años. Esto ha generado fuertes efectos adversos para estos ecosistemas. Un de los efectos más evidentes ha sido el fenómeno de pardeamiento foliar (Efecto *Browning*), el cual consiste en la desecación de los órganos foliares de especies arbóreas (Quillay, litre, maitén, bollen, etc.). Este efecto es variado, generando en algunos casos la muerte de algunos individuos. Este fenómeno ha sido paulatino desde el año 2000, sin embargo, durante el periodo estival 2019-2020 se produjo un colapso sincrónico y abrupto de la pérdida foliar de muchos remanentes de bosque esclerófilo en la zona central. Junto a este fenómeno que se ha desarrollado junto al periodo de hipersequía, se ha observado un aumento paulatino y sostenido de los eventos extremos de calor (Olas de calor). Estas dos componentes han sido muy perjudiciales para el bosque esclerófilo, el cual es altamente dependiente del contenido de humedad suficiente para su funcionalidad. Es por esto que, ante estas problemáticas, la presente memoria de título estudia la relación entre los fenómenos de pardeamiento foliar y los eventos extremos de calor, a través de índices espectrales y la evapotranspiración como función ecológica del contenido de humedad. El área de estudio corresponde al Parque Nacional Río Clarillo (PRNC), debido a que esta conserva uno de los principales remantes de bosque esclerófilo de la zona mediterránea, y posee datos suficientes para esta investigación.

Índice de Contenidos

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	7
1.1. - Introducción	7
1.2. - Planteamiento del problema	9
1.3. - Objetivos	11
1.4. - Estado del Arte	12
1.4.1. - Efecto <i>Browning</i> o pardeamiento foliar.	12
1.4.2. - La evapotranspiración como función ecológica.	14
1.4.3. - Eventos extremos de calor.	16
1.5. - Justificación del área de estudio.	17
1.5.1. - Parque Nacional Río Clarillo.	17
1.5.2. - Biogeografía.	19
1.5.3 Climatología.	20
CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	22
2.1. - Metodología	22
2.2. - Etapa I: Obtención de datos e imágenes	22
2.2.1. - Selección de sitios de muestreo	22
2.2.2. - Selección de Imágenes Satelitales Sentinel-2	23
2.2.3. - Obtención de los valores de Evapotranspiración diaria.	25
2.2.4. - Adquisición de Datos Meteorológicos.	26
2.3. - Etapa II: Aplicación de Métodos	27
2.3.1.- Aplicación del Índice Normalizado de Diferencia de Agua (NDWI)	27
2.3.2.- Aplicación del Índice de Vegetación Verde de Diferencia Normalizada (GNDVI) 28	
2.3.3. - Determinación de eventos extremos de calor (OC) en el PNRC.	28
2.3.4. - Estimación distribución espacial de la Evapotranspiración.	29
2.4. - Etapa III: Integración temporal entre variables de índices espectrales y microclimáticas.	29
2.4.1. – Correlación temporal y coeficiente de determinación entre las variables.	29
2.4.2 – Aplicación de test de significancia estadístico entre variables	31
2.5. – Esquema Metodológico	32

CAPÍTULO 3: RESULTADOS	33
3.1.- Análisis del Pardeamiento Foliar	33
3.1.1- Muestreo de coberturas afectadas por el pardeamiento foliar	33
3.1.2- Dinámica espacio temporal del contenido de humedad.....	36
3.1.3.- Estimación de la pérdida foliar mediante el índice GNDVI.....	41
3.1.3. Correlación y significancia estadística entre índices espectrales	44
3.2 Análisis microclimático	46
3.2.1. Dinámica espacio temporal de la Evapotranspiración.....	46
3.2.2.- Relación temporal entre la evapotranspiración y los eventos de calor extremo	49
CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	51
4.1.- DISCUSIÓN	51
4.1.2.- Dinámica de las superficies bajo efectos de pardeamiento.....	51
4.1.2.- Dinámica microclimática de la evapotranspiración y las olas de calor.....	52
4.2.- CONCLUSIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	54
ANEXOS	58

Índice de Figuras

Figura N°1:Productividad vegetal mediante índice NDVI 2015-2020	12
Figura N° 2: Desecamiento foliar en Quillaja saponaria, “Sendero Aliwen Mahuida”	13
Figura N° 3: Dinámica mensual de la Evapotranspiración diaria promedio en relación con la temperatura máxima promedio.....	15
Figura N° 4: Eventos de Olas de calor durante el periodo de 2010-2020.	16
Figura N° 5: Cartografía Área de Estudio: Parque Nacional Río Clarillo.	18
Figura N° 6: Fotografía bosque esclerófilo, Quebrada Los Bueyes, PNRC.	20
Figura N° 7: Climograma Parque Nacional Río Clarillo, años 1995-2020.....	21
Figura N° 8: Proceso de selección de sitios de muestreo	23
Figura N° 9: Ecuación Índice de diferencia de agua NDWI.	27
Figura N° 10: Ecuación de índice de verdor GNDVI	28
Figura N° 11: Esquema Metodológico.....	32
Figura N° 12: Sitios de muestreo	33
Figura N° 13: Total de sitios de muestreo según sus criterios de clasificación.	34
Figura N° 14: Distribución espacial del contenido de humedad NDWI	36
Figura N° 15: Distribución espacio temporal del índice NDWI.	37
Figura N° 16: Dinámica temporal del contenido de humedad según coberturas.	38
Figura N° 17: Dinámica temporal del contenido de humedad según exposición.....	39
Figura N° 18:Evolución temporal del contenido de humedad según grupos de muestreo.....	40
Figura N° 19: Distribución espacial del verdor de la vegetación GNDVI.....	41
Figura N° 20: Distribución espacio temporal del índice GNDVI.	42
Figura N° 21: Dinámica temporal del índice GNDVI según coberturas boscosas.....	43
Figura N° 22: Dinámica temporal del índice GNDVI según exposición	44
Figura N° 23: Distribución espacial de la Evapotranspiración promedio mensual.....	46
Figura N° 24: Dinámica temporal de la evapotranspiración promedio mensual según coberturas boscosas.....	47
Figura N° 25: Dinámica temporal de la evapotranspiración promedio mensual según exposición..	48
Figura N° 26: Relación temporal entre Evapotranspiración diaria y los eventos extremos de calor durante el periodo de estudio	49
Anexo N°1: Valores diarios de Temperatura máxima (Tmax), umbrales críticos Tmax y Olas de Calor.....	58

Índice de Tablas

Tabla N° 1: Superficie de coberturas boscosas en el PNRC.	19
Tabla N° 2: Selección Imágenes Sentinel-2 según periodicidad y nubosidad.	24
Tabla N° 3: Selección imágenes ECOSTRESS según fecha y hora.	25
Tabla N° 4: Valores de estrés hídrico según índice NDWI.....	27
Tabla N° 5: Valores de correlación coeficiente “R”.	30
Tabla N° 6: Atributos de selección según cada sitio de muestreo.....	35
Tabla N° 7: Coeficiente r y r2 de entre índices NDWI y GNDVI	44
Tabla N° 8: Datos de coeficiente de r y r2 de Etd y eventos extremos de calor (Oc).....	50

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

1.1. - Introducción

La zona de Chile central comprende los ecosistemas de tipo mediterráneo, estos son característicos por ser resistentes y adaptativos ante la marcada estacionalidad de un clima con veranos cálidos secos e inviernos fríos y lluviosos, marcado por una fuerte irregularidad de las precipitaciones (Gajardo, 1995). Esta región se encuentra enmarcada entre dos altos y extensos cordones montañosos en dirección norte-sur, entre los 32°45' y los 37°30' sur. Estos relieves corresponden a las áreas donde se concentran la mayor cantidad de precipitaciones, siendo refugios para la vegetación, que se extiende en laderas de ambas cordilleras (Quintanilla et al., 2012). La vegetación predominante en montes y laderas es la de matorrales y bosques esclerófilos mientras que en lomajes medios predominan sabanas y estepas de Acacia Caven (Salinas et al., 2018). Estos ecosistemas están compuestos por arbustos herbáceos, matorrales y arbustivos, los cuales en su mayoría poseen hojas de carácter perenne, duras, resistentes y frecuentemente con vellosidad. Estos atributos les permite regular su metabolismo y reducir la pérdida de agua durante las sequías (Alberdi, 1995). Estos atributos son propios por las condiciones ecofisiológicas de las especies, las cuales responden a mecanismos de adaptación típica de estos ambientes. Estos ecosistemas poseen la cualidad de no ser tan extensos, y concentrar una gran diversidad de especies. En Chile central la riqueza de especies alcanza unas 2.573 especies, de las cuales 46,3% son endémicas de Chile, y 23,4% son endémicas del área mediterránea (Arroyo & Cavieres, 1997). Con esta particularidad, y frente al progresivo avance de la degradación se le dio la categoría de *hotspot* o “puntos calientes” de biodiversidad con prioridad de conservación (Arroyo et al., 2006).

La zona mediterránea posee una larga data de intervención antrópica, siendo sometida por la acción humana a un constante retroceso, encontrándose hoy de manera remanente y cada vez más fragmentada (Salinas et al., 2018). Este estado se explica principalmente por la conversión de matorrales en usos intensivos de la tierra, para su cultivo, o expansión urbana (Schulz et al., 2010). En términos generales, la deforestación de estos bosques ha generado una progresiva degradación, ya que la regeneración pasiva permanecen como matorrales y no conformando bosque con coberturas densas, debido a la baja capacidad de recuperación natural (Schulz et al., 2010). Se estima que la superficie perdida de los bosques esclerófilos es cercana al 40% de su superficie durante los últimos 50 años, siendo los más deforestados del país (Miranda et al., 2018).

La deforestación y pérdida de hábitat son temas ampliamente estudiados, sin embargo, un problema que ha parecido menos evidente ha sido el efecto del cambio climático y la sequía sobre las áreas remanentes de los bosques nativos, las cuales son de especial interés para su

conservación (Miranda et al., 2020). Fenómenos como las sequías y las olas de calor son reconocidos como efectos agravantes para los ecosistemas mediterráneos.

El clima determina en gran medida la distribución de los ecosistemas, tanto a escala sinóptica como a nivel de sitio (Luebert & Pliscoff, 2006). En tal sentido los ecosistemas se encuentran expuestos a condiciones macroclimáticas como lo son las sequías. Estas influyen en los procesos ecológicos a una escala de paisaje, afectando, por ejemplo, los patrones espaciales de distribución. Autores como Luebert y Pliscoff (2012) y Salinas (2018) concuerdan en que para los climas mediterráneos la variación espacial de las temperaturas y precipitaciones está fuertemente influenciada por la elevación y orientación respecto a los grandes cordones montañosos.

Sin embargo, a nivel de sitio, se encuentran varios escenarios debido a la diversidad de variables que configuración el hábitat (Echeverría et al., 2014). Las condiciones más locales están sujetas en gran medida a variables microclimáticas, donde el relieve y la vegetación presentan una mayor influencia en términos de disponibilidad de agua, cobertura, exposición, altura, etc. Estas variables han sido agudizadas durante los últimos diez años bajo el fenómeno denominado “mega sequía”, por lo que resulta interesante analizar el comportamiento local en las zonas que gozan de condiciones favorables para la contención de estos efectos. Teniendo en consideración la actual situación resulta primordial analizar este comportamiento ya que la disponibilidad estacional de agua es probablemente el factor que determina en mayor medida la actividad de las plantas en climas mediterráneos (Lieberman, 1982; Frankie et al., 1974; Borchert, 1994) en Luna (2011).

Estos indicadores son menos estudiados, pues la mayoría de las acciones de monitoreo de ecosistemas se centran en indicadores terrestres (Aguilar-Garavito & Ramírez, 2015) y no así microclimáticas. Para ello, esta investigación busca analizar los efectos de la sequía, con especial atención sobre el proceso de pardeamiento foliar sobre ecosistemas mediterráneos desde una visión microclimática. Sus alcances son limitados a modo de entender el fenómeno, sin averiguar lo que sucede a nivel fisiológico en las especies.

La presente memoria de título se basa en la motivación por la urgente necesidad de afrontar los desafíos para la conservación y restauración del bosque esclerófilo mediterráneo. Por lo cual este se enfoca como ejercicio o técnica aplicable de monitoreo para el seguimiento y comprensión de su comportamiento frente a un escenario de incertidumbre climática y ecológica.

1.2. - Planteamiento del problema

En el contexto de cambio climático, existe cierto consenso sobre las proyecciones para la zona central, estas indican un significativo aumento de las temperaturas, con alzas de 2° a 4° C, y disminuciones cercanas al 30% de las precipitaciones (Fuenzalida et al., 2007). Este pronóstico prevé una afectación que hasta ahora ha sido visible a través de los efectos generados por la megasequía, siendo esta una posible anticipación de las condiciones futuras a mediano plazo para la zona central (Boisier et al., 2016). Esta sequía se ha prolongado por al menos 10 años, alcanzando en el año 2018-2020 un estado de hipersequía, con déficits de entre 50% y 80% de precipitaciones anuales en la región metropolitana. Los fenómenos climáticos extremos, como las sequías, son uno de los componentes del cambio climático, y de acuerdo con lo estudiado, se prevé que estos eventos serán cada vez más frecuentes, duraderos, y sin un patrón claro (Sarricolea & Meseguer, 2016).

Los efectos de la sequía han sometido a la vegetación mediterránea a un estrés ambiental, causando una multiplicidad de efectos ecológicos, sociales y económicos (Garreaud et al., 2017), los cuales cuestionan la capacidad socioecosistémica adaptativa a las condiciones de un futuro más seco y cálido. Frente a estas problemáticas se requiere una visión integral que sea capaz de gestionar a nivel de cuenca, acompañado de una capacidad técnica capaz de recopilar y elaborar información cuantitativa, oportuna, fidedigna y representativa sobre la cual fundar decisiones (CR2, 2015).

El monitoreo se presenta como una herramienta fundamental, permitiendo el seguimiento en tiempo de sus diferentes atributos, volviéndose una tarea de relevancia estratégica para la toma de decisiones de manejo, restauración y conservación (Miranda et al., 2018). En tal sentido, monitorear de manera eficiente significa aportar con visiones integradas, por lo que sumar las variables funcionales microclimáticas a nivel de sitio puede generar en ayuda para la toma de decisiones climáticas inteligentes.

La megasequía ha generado diversos impactos, uno de los efectos más visible y evidentes, ha sido el progresivo efecto de pardeamiento foliar sobre el bosque esclerófilo de la zona central. Este fenómeno consiste en un proceso de desecación de las hojas de especies arbóreas y arbustivas, generando una sucesiva pérdida de las hojas, e incluso paulatinamente la muerte de algunas especies. Este fenómeno ha sido observado desde inicios de la megasequía, agudizándose durante periodos estivales debido a la concentración de altas temperaturas, sin embargo, durante el periodo de hipersequía 2019-2020, la situación se agravó, produciéndose una pérdida sincrónica del verdor de las hojas, generando un cambio abrupto y generalizado sobre los bosques de la zona central.

Este fenómeno ha sido observado en otros sectores mediterráneos del mundo, asociado a eventos de cambio climático como las sequías (Garreaud et al., 2017), siendo particularmente

la vegetación de la zona central la más susceptible al estrés hídrico producida por estos eventos (Cabrera., 2002). Se estimaba que cerca de un tercio de la superficie total de los bosques de Chile central han sido afectados por este fenómeno, siendo las zonas precordilleranas las más afectadas (Miranda et al., 2020).

Dadas las condiciones ambientales locales, las zonas que proporcionan mayor humedad y una mayor composición forestal, corresponden a sectores que han sido capaces de resistir y amortiguar los efectos de escasez hídrica (Becerra., 2020). Estos sectores se constituyen bajo condiciones microclimáticas que favorecen la retención de humedad, como lo es el Parque Nacional Río Clarillo (PNRC), sin embargo, durante el periodo de hipersequía (2018-2020) comenzó un experimentó cambios abruptos de pardeamiento, los cuales ocurrieron durante los periodos estivales de 2018-2019, y en mayor grado entre 2019-2020. Aumentando la superficie de cobertura afectada y el grado de desecación.

Estos periodos concentraron el mayor número de olas de calor registradas durante los últimos diez años de megasequía (49 para cada año) en la región metropolitana (DMC, 2020). Entendiendo la ocurrencia de estos fenómenos, cabe cuestionarse acerca de la similitud y correlación de ambos procesos. De acuerdo con Padrón (2020), sumado a las altas temperaturas, se ha observado un aumento en la evapotranspiración a nivel regional, de estaciones secas más secas, lo cual coincide con lo analizado a nivel fisiológico por Paula (2020), pues la desecación de los órganos foliares se intensifica en la medida de no poder contener suficiente humedad, lo cual conduce a que los tejidos se deshidraten.

Este fenómeno genera la idea de que los ecosistemas mediterráneos estén alcanzando un umbral en su capacidad de resistencia a las precipitaciones prevalecientes, o bien sea una respuesta adaptativa para reducir la pérdida de agua (Miranda et al., 2020). Siendo la ecorregión mediterránea vulnerable a los escenarios de cambio climático, lo experimentado hasta ahora concuerda con los cambios regionales esperados por el clima (Bambach et al., 2013). En efecto, es probable que con las condiciones actuales los ecosistemas mediterráneos como el bosque esclerófilo se encuentren en un punto de inflexión en su desarrollo, siendo cada vez más evidentes sus impactos y necesario el uso de las herramientas como el monitoreo.

Es preciso analizar desde un punto de vista microclimático la ocurrencia de estos fenómenos ¿De qué formas se relacionan los fenómenos de estrés vegetal como el pardeamiento foliar, con la dinámica micro climática de evapotranspiración y eventos extremos de calor? Este trabajo pretende aportar en el entendimiento sobre el fenómeno, incorporado la relación del ecosistema con los procesos de evapotranspiración ante los eventos extremos de calor, siendo a la vez un ejercicio de monitoreo microclimático.

1.3. - Objetivos

- **Objetivo General:**

- ❖ Analizar el fenómeno de pardeamiento foliar en términos de estrés arbóreo, evapotranspiración y su relación con los eventos de calor extremo durante el periodo estival de 2019-2020 en el Parque Nacional Río Clarillo.

- **Objetivos específicos:**

1. Identificar la productividad vegetal de las coberturas de bosque esclerófilo afectadas por el pardeamiento foliar y su contenido de humedad.
2. Determinar la evapotranspiración y los eventos extremos de calor durante el periodo estival de 2019-2020 en el Parque Nacional Río Clarillo.
3. Integrar la relación temporal entre los procesos de evapotranspiración y eventos de calor extremo.

1.4. - Estado del Arte

1.4.1. - Efecto *Browning* o pardeamiento foliar.

El efecto *Browning*, conocido como pardeamiento en español, corresponde al fenómeno de pérdida de verdor y desecamiento de los órganos foliares en especies arbóreas y matorrales. Este se asocia con los efectos de sequía atribuible al estrés de la pérdida de humedad a través de la evapotranspiración y altas temperaturas (Allen et al., 2010). Los efectos sobre la vegetación son variados y están limitados de acuerdo con la escalas y periodos en que se presente, generando efectos de distinta gravedad, desde el desecamiento foliar a la mortandad de especies arbóreas (de Jong et al., 2012). No obstante, se considera como una amenaza potencial hacia la estructura y la funcionalidad de los ecosistemas (Pan et al., 2018).

Durante las últimas décadas este proceso ha sido investigado en varias regiones mediterráneas del planeta, existiendo un consenso en las evaluaciones de los patrones globales, siendo el hemisferio sur una de las secciones más afectadas, presentando efectos más duraderos y acelerados (Allen et al., 2010; de Jong et al., 2012;) Para el caso de los bosques esclerófilos de Chile central este fenómeno se asocia como consecuencia por los efectos inducidos por la sequía, atribuible a la baja de precipitaciones y aumento de los fenómenos extremos de calor (Miranda et al., 2020). Este efecto ha sido mucho más visible y evidente durante el periodo de sequía 2010-2020, sin embargo, este alcanza su fase más crítica durante el periodo estival de 2019-2020, donde se produce un pardeamiento sincrónico y generalizado de coberturas boscosas (Figura n°1). Se estima que los ecosistemas precordilleranos han sido los más afectados por este fenómeno, lo cual se asocia a las mayores exposiciones de radiación, en términos generales se estima que cerca del 80% de radiación incide, o es absorbida por las copas (Hajek et al., 1989).

Figura N°1: Productividad vegetal mediante índice NDVI 2015-2020. Fuente: Elaboración propia en base a datos MODIS extraídos desde SATVeg



La figura N°1 expresa la baja de productividad primaria neta producida durante el proceso de pardeamiento sincrónico durante el periodo estival 2019-2020 (Marcado en verde). Estudios recientes sobre este fenómeno han utilizado series de tiempo de diversos índices derivadas de satélites para explorar los patrones geográficos a largo plazo, siendo generalmente de carácter sinóptico con escalas a nivel regional y global, para la zona central se ha reportado una pérdida en el verdor desde el año 2000, sin embargo desde el periodo de sequía este ha sido más pronunciado alcanzando su pick de baja durante el pardeamiento sincrónico del periodo estival 2019-2020 (Becerra et al., 2020). El enfoque para esta memoria, al contrario, pretende ser más flexible, tomando como área de estudio una escala a nivel de cuenca para evaluaciones más locales, y de una serie de tiempo estival, entendiendo el estrés vegetacional que sufren estos ecosistemas como una fase de estrés hídrico y de pérdida foliar.

Este fenómeno ha afectado particularmente a los bosques de la zona central, incluyendo diversas composiciones y estructuras de estos ecosistemas (Figura N°2). Las coberturas densas y semidensas han sido las más afectadas, siendo especies como el Quillay (*Quillaja saponaria*), Boldo (*Peumus boldus*), Peumo (*Cryptocarya alba*), Litre (*Lithraea caustica*), Bollen (*Kageneckia oblonga*), incluso algunas especies hidrófitas como el Lingue (*Persea lingue*) y Canelo (*Drimys winteri*), las más afectadas. Las coberturas abiertas han mostrado una mayor resistencia, compuestas por sabanas de Espino (*Vachellia caven*) y matorral esclerófilo.

Figura N° 2: Desecamiento foliar en Quillaja saponaria, “Sendero Aliwen Mahuida”.



Fuente: Captura propia, noviembre 2020. Nótese la desecación completa de la copa del ejemplar a la izquierda. A la derecha se observa en mayor detalle el secamiento de las hojas.

1.4.2. - La evapotranspiración como función ecológica.

La evapotranspiración comprende una parte sustancial como regulador energético de los ecosistemas, los cuales se rigen en condiciones macro y micro climáticas. EL microclima comprende una gran cantidad de variables que componen las condiciones climáticas propias de un lugar, estas influencias de manera particular en cada zona, presentando una modificación al clima general de la región (Barnes et al., 1998, en Promis, 2010). Dentro de estas variables, el relieve es un factor modelador para los microclimas precordilleranos, determinando a través de la exposición la cantidad de radiación a la que se exponen los ecosistemas. Por otro lado, mediante la forma del paisaje se definen las condiciones hídricas, siendo las quebradas de orientación sur los principales lugares que favorecen las condiciones húmedas de un lugar.

Los ecosistemas generan una acción sobre el microclima, generando diversas “zonificaciones microclimáticas”¹ dependiendo del tipo de vegetación. La presencia de cubiertas forestales modifica y crea particularidades microclimáticas muy diferentes con respecto a otras clases de vegetación, esto quiere decir que, a mayor cobertura vegetal, mayor capacidad de contención de humedad. Esto depende en gran medida de la estructura de la cubierta vegetal, incidiendo de tal manera en el comportamiento térmico e hídrico (Promis, 2010). Esta relación da lugar a un ciclo recíproco de retroalimentación donde las mayores cubiertas arbóreas favorecen las condiciones de disponibilidad hídricas para mantener al bosque, como captura de precipitación, retención de humedad, y evapotranspiración, etc. De esta manera, las zonas mayormente cubiertas son capaces de generar condiciones propicias para retener humedad. Esta última condición resulta fundamental para la actividad funcional de los ecosistemas mediterráneos (Hajek et al., 1989; Valladares et al., 2008).

Los fenómenos como las sequías y los eventos extremos de calor alteran las variables microclimáticas propias, sometiendo a épocas de estrés hídrico a los ecosistemas presentes, por ello la presente memoria se centra en el análisis de la evapotranspiración, debido a su importancia en el intercambio de energía y agua entre la superficie de la tierra y la atmosfera, siendo un vínculo crítico entre el agua y la salud de las plantas (Hulley & Hook, 2017).

La evapotranspiración es el proceso más importante para la estimación del balance energético en un ecosistema, esta consiste en la conversión líquida a forma de vapor desde una superficie con cubierta vegetal (Elías y Castellví, 1996; Olivera et al., 2013). Este proceso actúa mediante la radiación que se infiltra o bien es absorbida por el dosel. En esta transferencia de energía se genera una relación directa entre radiación y evapotranspiración, la cual es

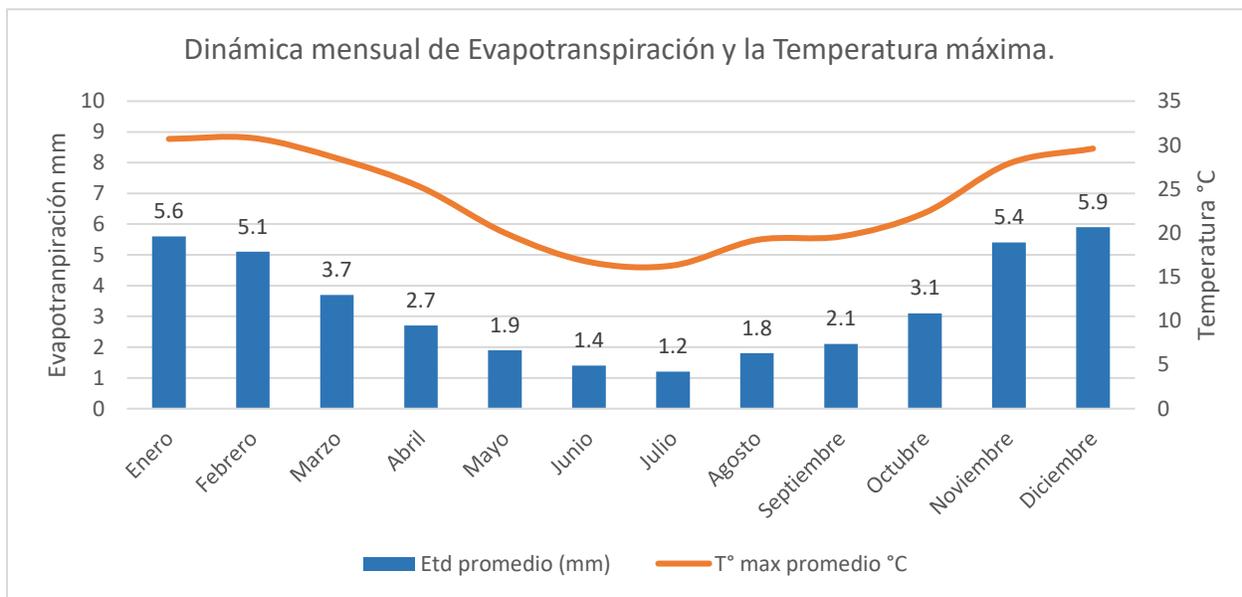
1 Concepto utilizado por Hajek, E et al., (1989), *Zonacion microclimática por efecto de los manchones de arbustos en el matorral de Chile central*. P.92.

dependiente de la cobertura, es decir, la intercepción de la radiación y el área de superficie evaporativa están directamente relacionados con el dosel (Chen et al., 2019).

Este efecto se produce mediante los procesos de evaporación, el cual consiste en el proceso físico de vaporización, traspasándose a la atmosfera proveniente de los cuerpos que contengan líquido como el suelo, cuerpos de agua y la vegetación. Por otro lado, la transpiración corresponde a la pérdida de vapor de agua desde la vegetación hacia la atmósfera, dependiente básicamente de mecanismos fisiológicos entre los que destaca la regulación estomática. Este proceso posee una especial relación con la temperatura (Figura N°3), en la cual ambas variables comparten una dinámica anual similar.

Esta transferencia de energía resulta interesante de analizar bajo el contexto de pardeamiento, pues este efecto se genera en sobre las copas, lugar que presenta la mayor zona de evapotranspiración, además esta representa la disponibilidad hídrica y energética del ecosistema (Arias & Poveda, 2007). Esta unidad se expresa en mm, por unidad de tiempo, la cual expresa la cantidad de agua perdida.

Figura N° 3: Dinámica mensual de la Evapotranspiración diaria promedio en relación con la temperatura máxima promedio.



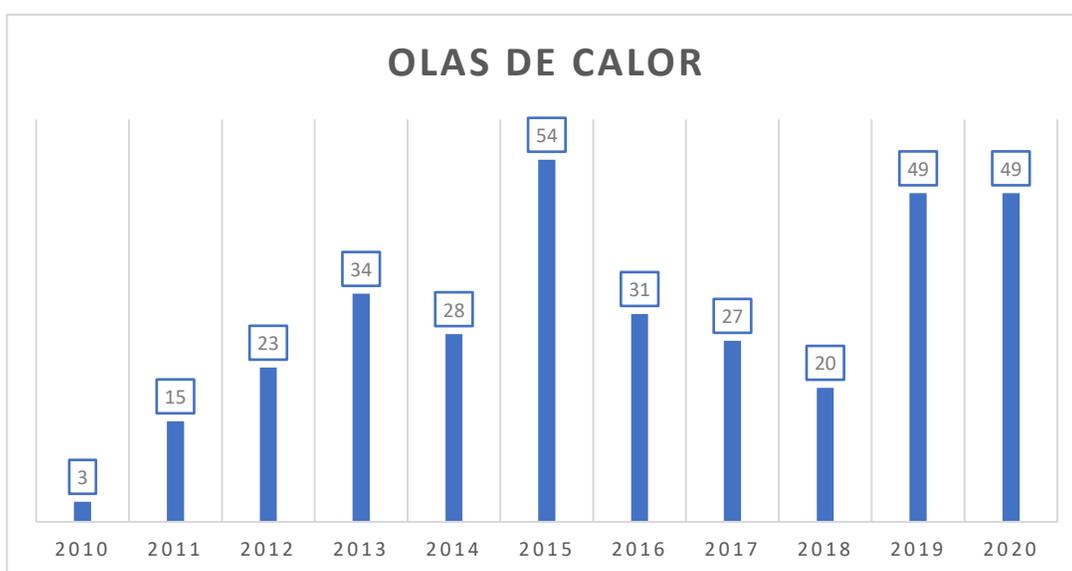
Fuente: Elaboración propia, en base a datos de 2019. Estación Río Clarillo (DMC,2020).

1.4.3. - Eventos extremos de calor.

De acuerdo con la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), las olas de calor son consideradas como eventos extremos de temperatura, entendidas como una continuidad de días donde la temperatura supera un umbral considerado como valor extremo, produciendo efectos adversos tanto para la salud de las personas, como para el medioambiente.

Existen varios tipos de olas de calor, dependiendo del día en que se producen, extensión y umbrales, entre ellas, las Olas de calor (Diurna) son definidas como “*toda vez que la temperatura máxima diaria supere el percentil 90 diario de distribución histórica, por tres días consecutivos o más en cualquier época del año*” (Dirección Meteorológica de Chile, 2020, p.3). También existen las Olas de Calor Nocturna, que se presentan cuando la temperatura mínima diaria supera un umbral estimado extremo. En ambos casos se requiere el cálculo de umbrales extremos, es decir temperaturas máximas o mínima estimadas como extremas. Estos umbrales varían según cada estación y época del año, y son definidos a partir de los datos obtenidos durante 30 años. En caso de no haber un registro completo durante este periodo, es aceptado definir un umbral con un número de datos faltantes, siendo estas estaciones tomadas con cautela. (DMC, 2020). Si bien en Chile la investigación sobre los efectos de estos eventos sobre los ecosistemas es escaso, existe evidencia acerca de los cambios potenciales que pueden generar sobre la biodiversidad y los ecosistemas (Marquet et al., 2019). La figura N°4 expresa la cantidad de olas de calor experimentadas durante la última década. Se ha registrado un incremento sostenido de eventos, en donde durante el periodo de estudio se experimentó la mayor ocurrencia.

Figura N° 4: Eventos de Olas de calor durante el periodo de 2010-2020.



Fuente: Elaboración propia, en base a datos de la estación Quinta Normal (DMC,2020).

1.5. - Justificación del área de estudio.

El área de estudio (Figura n°3) corresponde al Parque Nacional Río Clarillo (PNRC), delimitado a escala de cuenca hidrográfica la cual posee una superficie de 13.134 (ha). En términos político-administrativos se encuentra ubicada en la comuna de Pirque, región Metropolitana de Santiago (XIII), a 45 kilómetros de la ciudad de Santiago (33° 41' - 33° 51' S, 70°24' - 70° 29' O).

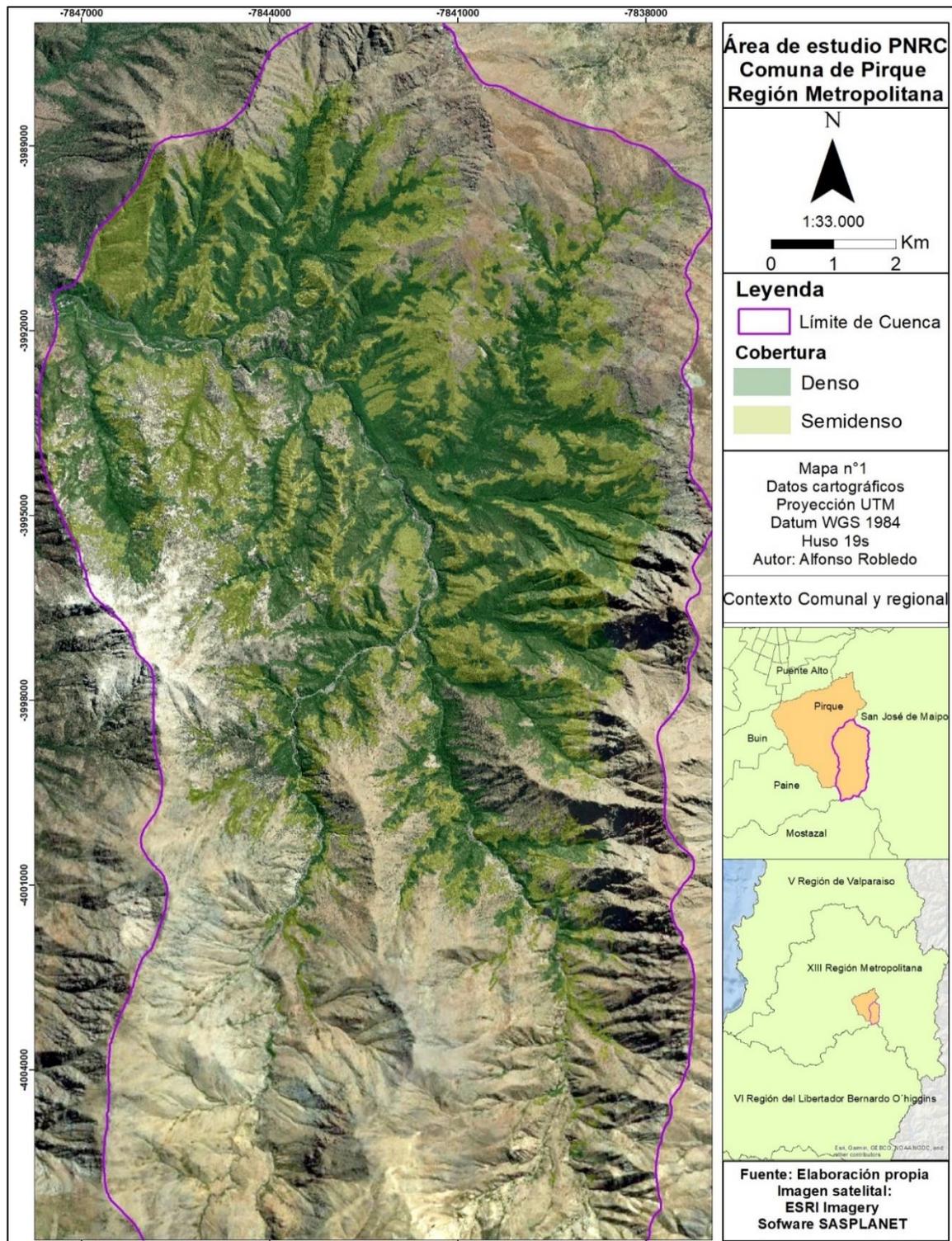
1.5.1. - Parque Nacional Río Clarillo.

El Parque Nacional Río Clarillo forma parte de las 105 unidades protegidas por el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE), siendo parte de los 41 parques nacionales, como el único en la región dentro de sus tres unidades protegidas, junto con la Reserva Nacional Roblería del Cobre (Alhué) de Loncha y el Monumento Natural el Morado (San José de Maipo). Fundada el 29 de enero de 1982 por el decreto supremo N°192 del ministerio de agricultura, donde se definen los deslindes y títulos de propiedad, siendo aprobado en 1996 su plan de manejo. Mediante el acuerdo N°83 del 4 de julio de 2016, se recategoriza la ex Reserva Río Clarillo a la categoría de Parque Nacional Río Clarillo, con el propósito de dar cumplimiento a la estrategia Regional para la Conservación de la biodiversidad de la Región Metropolitana 2015-2025, inaugurado en 17 de diciembre de 2020, con un plazo máximo de 5 años para su la realización de su nuevo plan de manejo.

El objetivo general del Parque Nacional Río Clarillo es preservar una muestra representativa de los ecosistemas mediterráneos de la zona precordillerana y cordillerana de la región metropolitana (Diario Oficial, 2020). La cuenca del PNRC presenta cualidades únicas dentro de la zona mesomórfica del país, razón por la cual esta zona es de alto interés para la conservación. Debido a estas características el PNRC es uno de los pocos sectores que mantiene la vegetación mediterránea en condiciones de bosque. Actualmente el principal uso para el PNRC es la recreación, tiene un total de siete senderos, y las zonas con mayor uso intensivo se encuentran en terrazas fluviales del Río Clarillo (Niemeyer et al., 2002).

2 Publicada el 5 de marzo de 1982 por el diario oficial.

Figura N° 5: Cartografía Área de Estudio: Parque Nacional Río Clarillo.



Fuente: Elaboración propia mediante capa de cobertura vegetal elaborada por Garfias (2018).

1.5.2. - Biogeografía.

La cuenca del Parque Nacional Río Clarillo se enmarca en la región del bosque y matorral esclerófilo (Gajardo, 1995), la cual posee un 45% del total de especies endémicas de la zona central. Esta se localiza en los primeros frentes cordilleranos, esta condición le otorga una gran diversidad vegetacional, ya que cubre una gradiente altitudinal desde los 860 msnm a los 3057 msnm, desde bosques y matorral esclerófilo (1500 msnm) hasta la estepa alto andina, ambos ecosistemas de distinta composición y estructura (Díaz et al., 2002). La cuenca del PNR posee los siguientes pisos vegetacionales: Bosque esclerófilo mediterráneo andino de *Kageneckia angustifolia* (Bollén); Bosque esclerófilo mediterráneo andino de *Quillaja saponaria* (Quillay) y *Lithraea caustica* (Litre); Bosque espinoso mediterráneo andino de *Acacia caven* (Espino) y *Vacarais paniculata*; Matorral bajo mediterráneo andino de *Chuquiraga oppositifolia*; Matorral bajo mediterráneo andino de *Laretia acaulis*.

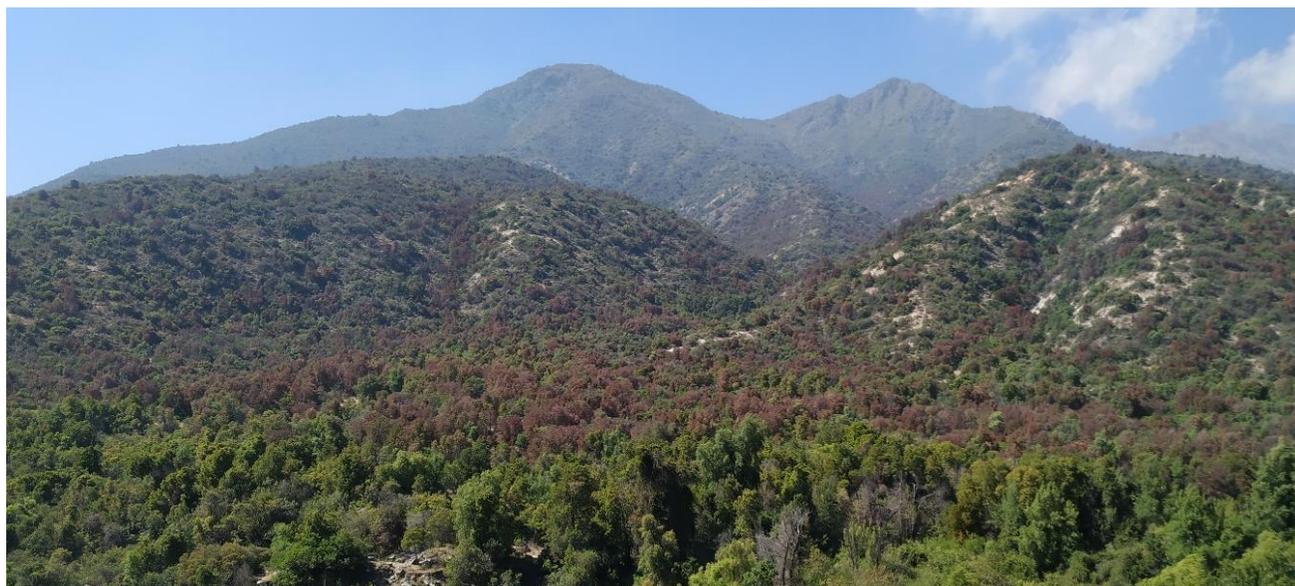
Dentro de estos ambientes, la fisionomía dominante, o más abundante corresponde a especies leñosas, siempreverdes y esclerófilas de coberturas densas y semidensas (Ver tabla n°1). Los bosques de carácter más hidrófilos de coberturas densas, en fondos de quebradas están conformados por *Persea lingue* (*lingue*), *Drimys winteri* (*canelo*), *Luma chequen* (*arrayán blanco*) y *Cryptocarya alba* (*Peumo*). En sectores más cercanos al río en terrazas fluviales, se encuentran especies de carácter méxicos como *Lithraea caustica* (Litre), *Kageneckia oblonga* (bollén), *Maytenus boaria* (maitén), *Quillaja saponaria* (quillay), y *Salix humboldtiana* (sauce criollo). Ascendiendo por zonas con exposición boreal, con coberturas generalmente semidensas se encuentra el matorral espinoso, compuesto principalmente por *Vachellia caven* (espino), *Sophora macrocarpa*, (Quebracho), *Azara integrifolia* (corcolén), *Colliguaja odorifera* (colliguay), *Ephedra chilensis* (pingo-pingo), *Baccharis linearis* (romerillo), suculentas como *Echinopsis chilensis* (quisco), y especies del género *Puya*, como *Puya chilensis* (Chagual). En las partes altas y ambientes alto andinos se encuentran bosquetes de *Escallonia myrtoidea* (lun), *Kageneckia angustifolia* (Frangel), y en los cajones del muerto y de los cipreses, de mayor altura, *Austrocedrus chilensis* (ciprés) (Niemeyer et al., 2002). En estas zonas se encuentran bofedales, con asociación de especies como la llaretilla (*Laretia acualis*), *Chuquiraga oppositifolia* (Hierva Blanca) y *Festuca orthophylla* (paja brava) (Teilier et al., 2005).

Tabla N° 1: Superficie de coberturas boscosas en el PNRC. Fuente: Elaboración propia en base Garfias et al. 2018.

Cobertura	Superficie (Ha)
Muy Abierta	241,1(4,2%)
Abierta	305,2(5,3%)
Semidenso	2.394,2 (41,9%)
Denso	2.769,8 (48,5%)
Total	5710,48

El PNRC contiene un 30% del total de las especies vasculares con problemas de conservación en la región metropolitana, tales como *Persea lingue* (Lingue), *Citronella mucronata* (Naranjillo), *Austrocedros chilensis* (ciprés de la cordillera). En cuanto a los vertebrados, 44 se encuentran en estas categorías, lo cual representa un total del 32% del total, de estos el grupo más amenazado es de los reptiles (93%), seguido por las aves (11%). De acuerdo con Díaz (2002), se han registrado un total de 127 especies de vertebrados terrestres, entre ellos el más numeroso corresponde a 85 aves (66%), 22 mamíferos (17%), 15 reptiles (11%) y cinco anfibios (3%).

Figura N° 6: Fotografía bosque esclerófilo, Quebrada Los Bueyes, PNRC.



Fuente: Elaboración propia, captura en terreno, noviembre 2020. Exposición sur. Nótese el efecto de pardeamiento sobre las copas arbóreas.

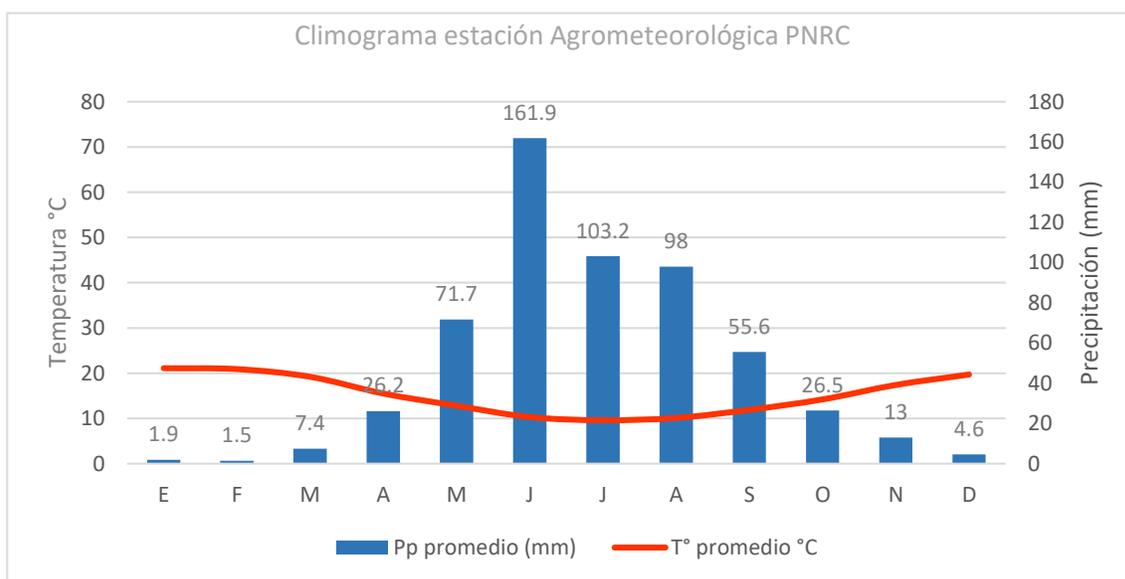
1.5.3 Climatología.

El Parque Nacional Río Clarillo se ubica en la zona central de Chile, característica por poseer un clima mediterráneo. Anualmente presenta una marcada oscilación estacional entre las épocas invernal y estival (figura n°4), esto se traduce en inviernos fríos con una alta concentración de las precipitaciones, y tres a cuatro meses de veranos secos y cálidos, con temperaturas promedio de 20°C y máximas por sobre los 30°C (Di Castri & Hajek, 1976). De acuerdo con el esquema climático de Köppen-Geiger, el PNRC se enmarca en clima mediterráneo de lluvia invernal de altura (Csb) y Clima mediterráneo frío de lluvia invernal (Csc) en sus partes más altas.

El PNRC presenta una fuerte influencia cordillerana, lo cual se manifiesta en sus precipitaciones, presentando un promedio anual de 640 mm/año, lo cual superan al doble los registros con respecto a la Depresión intermedia (Conaf, 2019), sin embargo durante los últimos 10 años de sequía la estación no ha registrado su media. La marcada estacionalidad determina en gran medida la oscilación del caudal del río, en efecto presenta un carácter bimodal, presentando crecidas en épocas invernales y caudales mínimos en época estival.

La figura N°7, Climograma PNRC presenta la dinámica anual de la temperatura promedio mensual (promedio entre Tmax y Tmin entre los años 1995-2020) y precipitación promedio mensual 1995-2020. Durante este periodo el promedio temperatura máxima durante la época estival es de 29,4°C, promedio es de 22°C, y mínimas de 7,8°C.

Figura N° 7: Climograma Parque Nacional Río Clarillo, años 1995-2020.



Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Conaf y DMC.

CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

2.1. - Metodología

La presente memoria de título posee un enfoque metodológico de Cuantitativo. Esta se basa en analizar el fenómeno de pardeamiento foliar. Y posteriormente distinguir la correlación de este fenómeno con los efectos de evapotranspiración y olas de calor. Este hecho no involucra modelos numéricos de estimación, sino más bien una conjunción de las variables a modo de expresar el fenómeno.

Como primer paso, resulta fundamental para esta metodología la selección de las zonas específicas de muestreo en la cuenca de acuerdo con el siguiente procedimiento. Esta metodología está estructurada a partir de tres etapas que se presentan a continuación:

2.2. - Etapa I: Obtención de datos e imágenes

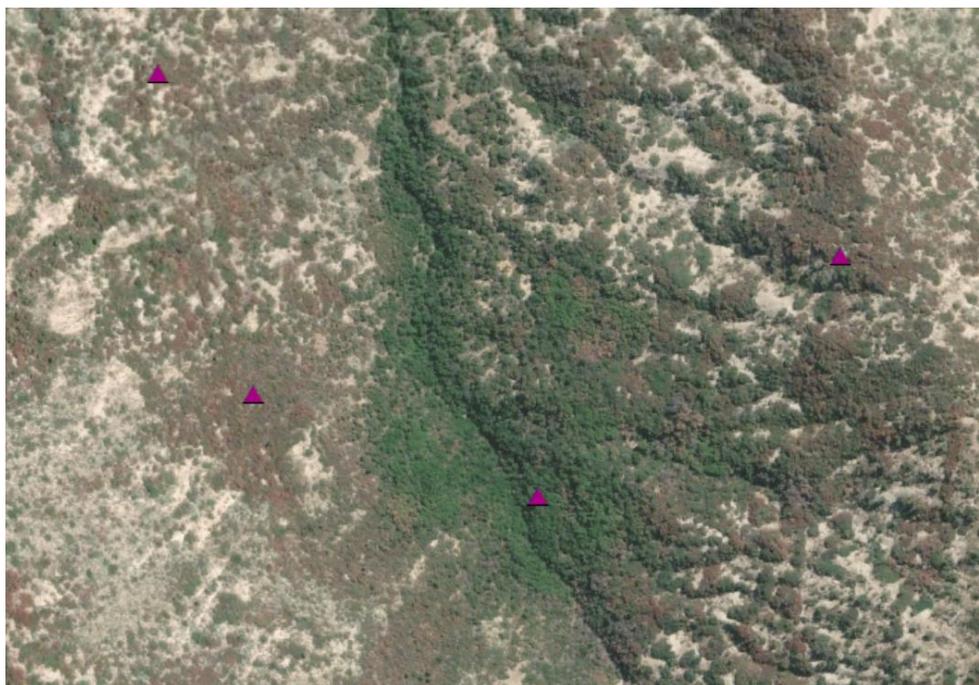
2.2.1. - Selección de sitios de muestreo

Debido a la condición de cuenca sub andina y complejidad del relieve del área de estudio, se presenta una amplia diversidad ecológica. Bajo estas circunstancias se requiere una metodología que permita incluir la variación según cada contexto, por esta razón se determinó aplicar la metodología utilizada por Miranda et al., (2020), la cual consiste en seleccionar sitios de muestreo a nivel de píxel. Esta metodología es utilizada tanto en análisis a escala local como de paisaje, siempre y cuando incluya el píxel como unidad de análisis.

Con el fin de determinar los sitios de muestreo se realizó un proceso sistemático de geolocalización mediante píxeles puros sobre las coberturas boscosas bajo efectos de pardeamiento activo e inactivo. De acuerdo con Lian y Chunyu (2009) los valores obtenidos desde imágenes satelitales corresponden al promedio de las características contenidas por cada píxel, de tal manera que estos logran ser representativos estableciendo clases. Por tanto, la selección pretendió ser lo más representativa posible, establecidos los criterios de cobertura, exposición y su estado de pardeamiento (activo o inactivo). Esos criterios pretenden expresar la diversidad de hábitats y comunidades ecológicas que se encuentran en la cuenca del río clarillo, compuesto por bosque y matorrales esclerófilos.

Se seleccionaron 50 sitios de muestreo distribuidos de tal forma que éstos abarquen la variabilidad espacial del área de estudio (ver figura n°12). Para la selección de estos sitios se utilizó como base cartográfica una imagen satelital ESRI, de alta definición en color verdadero, por lo que se logró generar un análisis geoespacial mediante el software ArcMap 10.6. Esta fue extraída desde el programa Sas Planet, generada el 7 de abril de 2020, siendo coherente con el periodo de estudio. La figura n°8 expresa el proceso de selección de sitios de muestreo mediante ArcMap 10.

Figura N° 8: Proceso de selección de sitios de muestreo activos e inactivos.



Fuente: Elaboración propia sobre imagen ESRI.

Uno de los principales criterios de selección es la cobertura, para su clasificación se utilizó la capa de coberturas Treinum y Moya (2018). La cual es un resumen actualizado de las superficies remanentes del bosque esclerófilo. Los bosques del PRNS se encuentran en las coberturas densas y semidensas principalmente, estos además han sido los sitios más afectados por el pardeamiento, específicamente los compuestos por Quillay y Litre (en laderas), a diferencia de los de Peumo y Boldo (fondo de quebradas). Mediante esta disyuntiva se incluyen sitios con pardeamiento activo (naranja) e inactivo (verde) (Figuran°12).

Para la organización de los puntos según su exposición se utilizó como marco referencial la metodología aplicada por Arancibia (2020) quien realizó un análisis vegetacional del bosque nativo de la región mediterránea conforme laderas de exposición norte y sur. Mediante esta clasificación se logra distinguir las diferencias ecológicas entre laderas de solana y umbría. De esta manera el muestreo abarca ambas laderas a través de lo extenso de la cuenca del Río Clarillo y sus afluentes. Junto a estos criterios se estimó la posición del píxel en un cuadrante de 30 m² (píxel de evapotranspiración) de cobertura lo más homogénea posible.

2.2.2. - Selección de Imágenes Satelitales Sentinel-2

A modo de estimar el estado vegetal en términos de estrés hídrico y la actividad fotosintética sobre los sitios de muestreo en el área de estudio, se propuso el uso de imágenes satelitales Sentinel -2. Esta misión pertenece al programa Copérnico liberada por la Comisión Europea (CE), y asistida por la Agencia Espacial Europea (ESA), esta tiene el fin de proporcionar abundante información de distribución gratuita para la gestión de los recursos

medioambientales y acciones de mitigación sobre los efectos de cambio climático (Freire, 2019). De acuerdo con lo señalado por Bezerra et al (2018), el satélite Sentinel-2, a diferencia de otros satélites como Landsat-8, permite una mayor discriminación de las coberturas, siendo de gran fiabilidad y precisión. Estadísticamente ello implica una mayor dispersión entre los valores.

La misión Sentinel-2 está compuesta por los satélites Sentinel 2A y 2B lanzados el 23 de junio de 2015; y 7 de marzo de 2017 respectivamente. Proporcionan imágenes de alta resolución de un cámara multispectral de 13 bandas, con resoluciones de 10 (B2, B3, B4 y B8), 20 (B2, B3, B4 y B8) y 60 (B1, B9 y B10) metros. Debido a su conformación, el satélite presenta una alta frecuencia de obtención de imágenes (5 y 10 días para el área de estudio).

La selección de imágenes se realizó según la disponibilidad periódica y el porcentaje de nubosidad en las imágenes. Se obtuvieron quince imágenes satelitales (tabla N°2), obtenidas desde el portal Open Access Hub3. Para esto fueron seleccionados los productos desde los sensores 2A y 2B, obteniéndose una periodicidad de diez exceptuando las fechas entre el 14 de enero al 3 de febrero, ya que durante este periodo las imágenes poseen un alto porcentaje de nubosidad, por ello también se decidió agregar una cuarta imagen al mes de febrero. Los porcentajes de nubosidad son bajos, y en los casos que representa un porcentaje más alto, no es realmente significativo ya que el área de estudio representa un 10 % del total de la imagen, y las superficies cubiertas se producen en otros sectores.

Tabla N° 2: Selección Imágenes Sentinel-2 según periodicidad y nubosidad.

Satélite	Año	Mes	Día	Producto	Nubosidad (%)
2B	2019	Noviembre	10	2A	2,3
2B			20	2A	2,2
2B			30	2A	29
2B		Diciembre	10	2A	1,5
2B			20	2A	1,9
2B			30	2A	1,5
2A	2020	Enero	04	2A	1,5
2A			14	2A	1,4
2A		Febrero	03	2A	0,8
2B			08	2A	1,8
2B			18	2A	1,7
2B			28	2A	1
2B		Marzo	9	2A	2,6
2B			19	2A	1,4
2B			29	2A	28

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que se prefirió la selección de imágenes producto de *nivel-2 A*, ya que estas son procesadas a nivel de superficie (BOA, bottom of atmosphere), siendo óptimas para paisajes con mayor relieve.

2.2.3. - Obtención de los valores de Evapotranspiración diaria.

Pese a que el área de estudio cuente con una estación meteorológica, los valores de evapotranspiración pueden variar enormemente debido a la complejidad del paisaje. De acuerdo con Olivera et al., (2013), los modelo basado en la teledetección se encuentran mejor posicionado para estimar magnitud y tendencia en áreas de estudio con mayor variación en el relieve, por lo que los valores fueron extraídos a partir de imágenes satelitales.

A partir de la selección de los sitios de muestreo se pudo obtener los valores generados por el por el sensor ECOSTRES. Estos fueron exportados desde ArcGIS en formato de texto, para ser cargados posteriormente en formato “csv” en la plataforma del USGS (United States Geological Survey), App Earth4. Desde esta se obtuvieron datos provenientes del sensor ECOSTRESS (Experimento del radiómetro térmico-espacial de los ecosistemas desde la estación espacial), el cual pertenece a la Administración Nacional de Aeronáutica (NASA) de los Estados Unidos, a cargo del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL siglas en ingles). El Instrumento Ecostress fue lanzado el 28 de junio de 2018 a bordo de la Estación Espacial Internacional (Fisher et al., 2020). Este sensor posee gran disponibilidad de imágenes con una buena periodicidad. A continuación, en la tabla N°3 presenta la disponibilidad de datos presentes para el área y periodo de estudio.

Tabla N° 3: Selección imágenes ECOSTRESS según fecha y hora.

<i>Año</i>	<i>Mes</i>	<i>Día</i>	<i>Hora</i>	<i>Año</i>	<i>Mes</i>	<i>Día</i>	<i>Hora</i>			
2019	Noviembre	03	17:45	2020	Enero	27	16:13			
			12			21:50	Febrero	04	12:06	
			15			21:02			08	11:32
			27			16:12			22	21:56
	Diciembre	01	14:35					26	20:23	
			09			11:21		Marzo	01	18:49
			12			10:32				09
		26	20:42						17	12:34
	2020	Enero	03			17:33			26	16:49
			10	15:10						
			20	18:33						

Fuente: Elaboración propia, en base a disponibilidad de datos desde App Earth.

4 Explorador App Earth: <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears/>

Ecostream proporciona nuevas mediciones de temperatura infrarroja térmica (TIR) con una resolución espacial de 30 x 30 m, cada 1 a 5 días. Este genera un conjunto de productos de datos enfocados a la disponibilidad del agua. Su principal enfoque científico sin embargo es la evapotranspiración (ET), que se produce como productos de datos de flujo de calor latente. Estas características le dan diversos usos a este sensor, siendo su principal objetivo, monitorear el estrés de las plantas a través de la temperatura (Hulley & Hook, 2017).

2.2.4. - Adquisición de Datos Meteorológicos.

Con el fin de estimar las Olas de Calor diurnas (OC) en el PNRC, se utilizó la nueva metodología propuesta por la Dirección Meteorológica de Chile (2020). A partir de ello se obtuvieron los datos de temperatura máxima diaria (Tmax d), proporcionados por Conaf y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), generados a partir de la de la estación agrometeorológica Río Clarillo (Código 33007533) durante el periodo de 1991 a 2020. A partir de esta recopilación, posteriormente se estimó los umbrales máximos de temperatura, ya que estos no están definidos para la Estación Río Clarillo.

Cabe mencionar que esta estación es de carácter colaborativo, por lo que presenta cierta discontinuidad de datos, además cuenta con una estación automática la cual proporciona datos desde 2017. Esta se encuentra ubicada a los 850 msnm, en el exutorio de la cuenca. Según lo propuesto por DMC (2020), es necesario un periodo mínimo de 30 años para definir eventos extremos de calor. Sin embargo, la discontinuidad de datos para la estación Río Clarillo es poco significativa (4 años) en comparación con otras estaciones que poseen discontinuidades mayores, por se decidió utilizar estos pese a esta discontinuidad.

Junto a estos datos también se obtuvieron los datos de evapotranspiración diaria y mensual (ETd y ETm) para el periodo de estudio. Estos datos se obtuvieron desde el portal de la DMC⁵, generados por la estación Río Clarillo.

5 Evapotranspiración total diaria estación Río Clarillo:

<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/informacion/inventarioComponentesPorEstacion/330075/152/405>

2.3. - Etapa II: Aplicación de Métodos

2.3.1.- Aplicación del Índice Normalizado de Diferencia de Agua (NDWI)

A modo de estimar el contenido de humedad y el estrés hídrico sobre los sitios de muestreo, se propone calcular el Índice Normalizado de diferencia de Agua (NDWI). Para ello se utilizó el software ArcGIS 10.6 para procesar y extraer los valores de NDWI desde las imágenes satelitales Sentinel-2 para el periodo de estudio.

Este índice es sensible a los cambios en el contenido de agua del dosel. Dentro de sus aplicaciones se incluye el análisis del estrés hídrico del dosel de los bosques, contenido de agua, modelaje de productividad y susceptibilidad al fuego (Villatoro, 2020). El cálculo de valores se realiza aplicando el método McFeeters mediante la ecuación presente en la figura N°9. Esta fórmula combina las bandas cercano infrarrojo (NIR) y verde (GREEN) del espectro electromagnético, respectivamente las bandas 3 y 8 para Sentinel-2. Los valores oscilan entre -1 y 1, siendo los valores más altos la presencia de agua y más bajos sin presencia contenido de humedad. Esto también posee una alta correlación sobre la fracción de radiación fotosintética absorbida por el dosel (Pech May, 2021).

Figura N° 9: Ecuación Índice de diferencia de agua NDWI.

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Esta ecuación viene incluida en el paquete de herramientas Sentinel-2 para ArcGIS 10.7, a la cual se debió ingresar las bandas para su cálculo. Primeramente, se estimó el índice a nivel de la cuenca del PNRC, a modo de estimar su distribución espacial. Posteriormente fueron extraídos los valores según los sitios de muestreo para cada imagen satelital del periodo de estudio. A modo de interpretar los valores generados por el NDWI, fue utilizada la reclasificación utilizada por Segura (2020). Esta reclasificación permite estimar los niveles de estrés hídrico de acuerdo con los valores de contenido de humedad (Tabla N°4).

Tabla N° 4: Valores de estrés hídrico según índice NDWI.

Nivel de estrés	Valor de Índice
Nieve-nubes-agua	0
Estrés máximo	0-0,1
Extremadamente alto	0,1-0,2
Muy alto	0,2-0,3
Alto	0,3-0,4
Moderado	0,4-0,5
Moderadamente bajo	0,5-0,6
Bajo	0,6-0,8
Muy bajo	>0,8

Fuente: Parámetros para determinar el nivel de estrés hídrico en un índice de contenido de humedad. Consejería de Desarrollo Sostenible, Andalucía. (2012), en Segura (2020).

2.3.2.- Aplicación del Índice de Vegetación Verde de Diferencia Normalizada (GNDVI)

El índice de vegetación verde de diferencia normalizada (GNDVI) es una modificación del índice NDVI, la cual Gitelson (1996) definió utilizar la banda verde en vez de la banda roja, argumentando que es al menos cinco veces más sensible a la concentración de clorofila que el NDVI, y particularmente útil para la diferenciación de vegetación estresada y senescente. Es utilizado principalmente para la estimación de los cambios del contenido de clorofilas sobre la vegetación, permitiendo evaluar el vigor del dosel. Estos componentes son vitales para la salud de los bosques. Se compone por las bandas infrarrojo cercano (NIR, B8 Sentinel-2) y verde (GREEN, B3 Sentinel-2). Los valores oscilan entre -1 y 1, siendo los valores negativos del GNDVI superficies cubiertas de agua, y suelos desnudos hasta 0,3. De 0,6 a 1 áreas de cubiertas con vegetación saludable (Alvarado et al., 2019).

Suponiendo que la cantidad de clorofila en el dosel disminuye debido al efecto de pardeamiento, resulta útil aplicar este índice como indicado para analizar el proceso de pérdida foliar durante el periodo de estudio. Este índice (Figura N°10) combina la banda verde e infrarrojo cercano, es decir las bandas 3 y 8 para Sentinel 2. Se ha demostrado que esta relación es sensible a la cantidad de verdor de las hojas. La respuesta a la reflectancia de acuerdo con el reverdecimiento o pérdida de las hojas

Figura N° 10: Ecuación de índice de verdor GNDVI

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$$

Este índice es mayormente utilizado sobre bosques mediterráneos. Esta condición se debe a que presenta mejor aplicabilidad para observar la heterogeneidad espacio temporal sobre ecosistemas con una menor biodiversidad boscosa (Alvarado et al., 2019). Estas características hacen interesante el uso de este índice para estimar la pérdida foliar producida por el pardeamiento sincrónica del verdor durante el periodo de estudio. Este índice fue aplicado mediante el programa ArcGIS 10.7 mediante el paquete de herramientas Sentinel-2, desde donde se debe introducir las bandas. Al igual que el índice NDWI, primeramente, se realizó un análisis a nivel de cuenca y posteriormente fueron extraídos los valores para ser analizados de manera independiente y luego en correlación temporal con las demás variables.

2.3.3. - Determinación de eventos extremos de calor (OC) en el PNRC.

Debido a que la estación Río Clarillo (330075) actualmente no posee umbrales máximos diarios de olas de calor OC, a modo de establecer estos para el Parque Nacional Río Clarillo (PNRC), se adopta la nueva metodología propuesta por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2020), la cual describe las OC bajo la siguiente definición:

“Toda vez que la temperatura máxima diaria supere el percentil 90 diario de distribución histórica (1981-2010), por tres días consecutivos o más en cualquier época del año”
(DMC, 2020. p3).

A modo de definir los umbrales de temperatura máxima diaria (sobre el percentil 90), se utilizaron las series diarias de temperatura máxima (Tmax), comprendidas entre los meses de noviembre a marzo durante el periodo 1991 a 2020 (30 años). Una vez agrupados y sistematizados (distribuidos por año, mes y día) los datos a través del software Excel, se aplicó un análisis armónico para el cálculo de percentil 90, generando un orden ascendente de los valores Tmax. Luego se establecieron los umbrales de temperatura máxima para cada día durante el periodo de estudio.

Posteriormente se estableció una serie de temporal de las olas de calor de según su intensidad (temperaturas máximas) y duración (superior a los tres días). Cabe mencionar que debido a que muchas olas de calor pueden cruzar de mes a mes, o año tras año, se ha estandarizado que la fecha de inicio corresponde al de su mes de ocurrencia.

2.3.4. - Estimación distribución espacial de la Evapotranspiración.

Una vez obtenidos los valores de evapotranspiración diaria (ETd), se procedió a la sistematización de los datos mediante el software Excel. Posteriormente, se realizó una revisión y validación de los valores ETd generados a partir de la estación Río Clarillo y el sensor ECOSTRESS. Para ello se empleó el Coeficiente de Correlación de Pearson, el cual corresponde a un instrumento estadístico para medir el grado de asociación entre variables. Este proceso se llevó a cabo en el software Excel.

Posteriormente se analizó la distribución espacial de los valores evapotranspiración en el PNRC. Para ello primeramente fueron estimados parámetros estadísticos (Media, mínima, máxima y desviación estándar) de la ETd por cobertura de bosque durante el periodo de estudio. Luego mediante el programa ArcGIS 10.6 se especializaron las variables a modo de generar la distribución espacial de la evapotranspiración según los sitios de muestreo en el PNRC.

2.4. - Etapa III: Integración temporal entre variables de índices espectrales y microclimáticas.

Durante esta etapa se precisó integrar los resultados obtenidos, generando un análisis temporal de la relación entre las variables analizadas. Para ello, primeramente, se estimó la relación entre el índice NDWI y la evapotranspiración. Posteriormente fue examinada relación entre las variables de Evapotranspiración diaria (ETd) y Eventos Extremos de Calor (Olas de Calor, OC). A continuación, se explica el análisis estadístico de correlación de Pearson (Entre índices y variables microclimáticas), las pruebas estadísticas de T de Student y Fisher.

2.4.1. – Correlación temporal y coeficiente de determinación entre las variables.

A modo examinar la relación entre las variables, se analizó la relación temporal entre las variables meteorológicas (Etd y OC). A modo de estimar la correlación entre estas, se empleó el Coeficiente de Correlación de Pearson. Este coeficiente permite ver la relación existente entre las variables, permitiendo una correlación cuantitativa y lineal (Segura, 2020).

Para ello se procesaron los datos de Evapotranspiración diaria (Etd) y temperatura máxima diaria (Tmax) desde la estación meteorológica Río Clarillo. Estos fueron tratados mediante el programa Excel. Luego se graficó la dinámica temporal del comportamiento de la Etd y Tmax, incluyendo los eventos de olas de calor (De acuerdo con su duración) para el periodo de estudio. Además de relacionar estas variables microclimáticas, a modo de comprender la relación entre el contenido de humedad y la productividad fotosintética se aplicó esta ecuación entre los índices NDWI y GNDVI. De esta manera se pretendió complementar la relación entre el fenómeno de pardeamiento y evapotranspiración.

A continuación, mediante la figura N°11 se presentan los valores correspondientes a la correlación según la ecuación de Pearson.

Tabla N° 5: Valores de correlación coeficiente “r”.

RANGO	CORRELACIONES COEFICIENTE “R”
- 1,00	Correlación negativa perfecta
- 0,90	Correlación negativa muy fuerte
- 0,75	Correlación negativa considerable
- 0,50	Correlación negativa media
- 0,10	Correlación negativa débil
0,00	No existe correlación lineal alguna entre las variables
0,10	Correlación positiva débil
0,50	Correlación positiva media
0,75	Correlación positiva considerable
0,90	Correlación positiva muy fuerte
1,00	Correlación positiva perfecta

Fuente: Segura (2020).

Junto con la estimación de la correlación se estimó necesario aplicar el Coeficiente de Determinación r^2 (R cuadrado). Este consiste en la proporción de varianza total de la variable explicada por la regresión (Rodríguez, 2005). Es el cuadrado de la correlación, que tiene como función principal predecir el resultado de una hipótesis. Mediante esta se pretendió probar la variación entre los factores de las variables. Primeramente, este se aplicó sobre la correlación entre los índices espectrales, y posteriormente se aplicó para la correlación entre Evapotranspiración (Et) y Temperatura Máxima (Tmax).

Una vez aplicada mediante el software Excel, el resultado oscila entre 0 y 1, mientras más cercana este el 1 más ajustada estarán las variables. Al contrario, mientras más cercano a 0 menos fiable será el modelo que se intenta probar.

2.4.2 – Aplicación de test de significancia estadístico entre variables

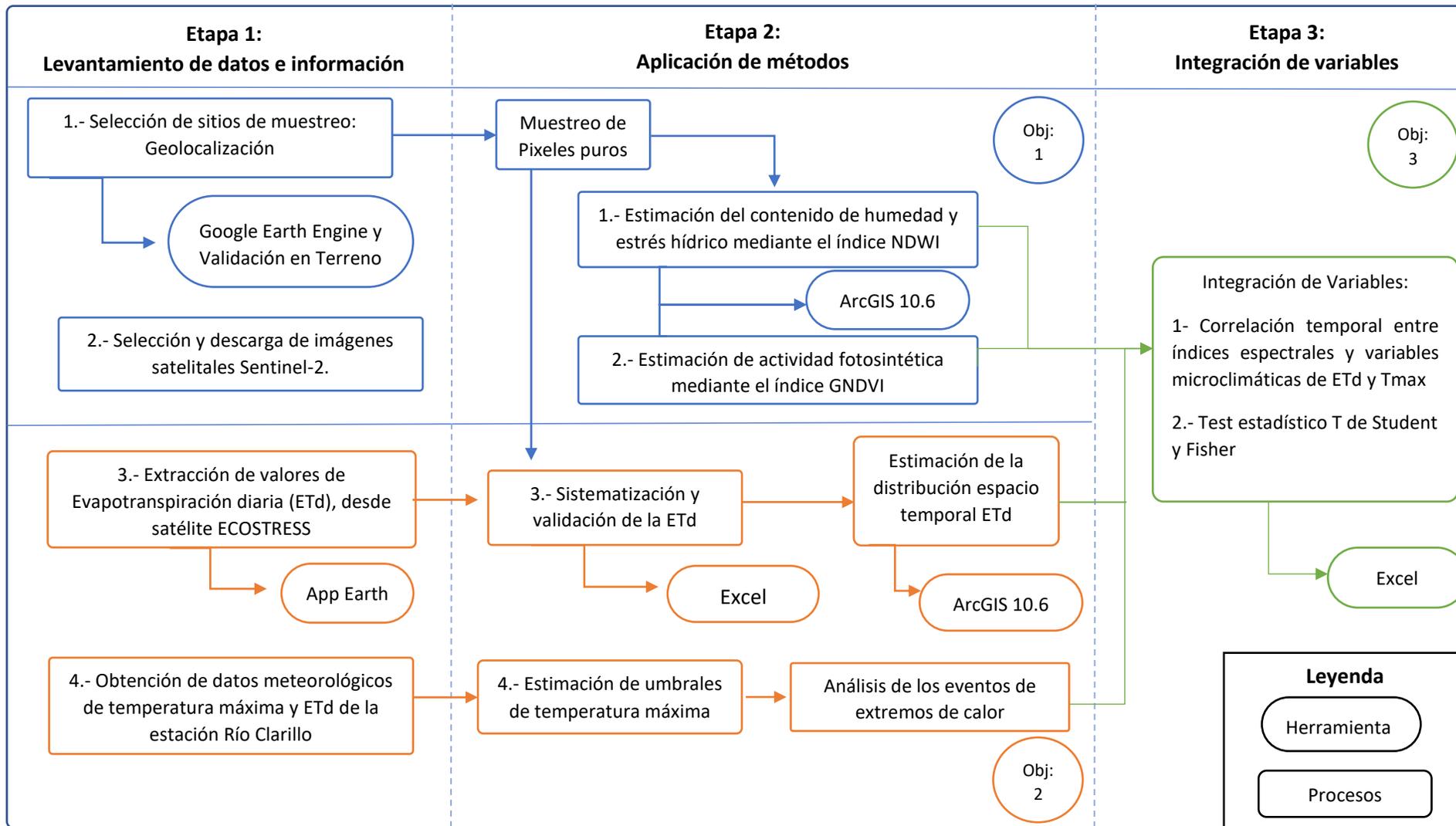
Para validar y evaluar si existe una diferencia significativa entre los valores generados a partir de los índices espectrales sobre los sitios de muestreo, se propuso utilizar la prueba “t” de Student, esta consiste en un tipo de estadística deductiva. Se utiliza para determinar si existe diferencia significativa entre la media de dos variables (Turcios, 2015), es ampliamente utilizada para comparar ubicaciones. A modo de generar un análisis completo sobre los índices, primero se realiza la prueba entre ambos índices, GNDVI (Verdor) y NDWI (Contenido de humedad), luego se realiza entre los sitios de muestreo con pardeamiento activo e inactivo tanto para GNDVI como para NDWI.

De acuerdo con lo señalado por (Turcios, 2015), se estima el valor p ($p < 0.05$) de la prueba de 5%, esto significa que la probabilidad de observar las diferencias en los datos al azar es de solo el 5%. De modo que si el valor p es inferior a 5% se rechaza la prueba de hipótesis nula (la cual significa que estas variables presentan una diferencia estadística significativa).

De la misma manera, para estimar si existen diferencias significativas entre las variables microclimáticas de evapotranspiración y los eventos extremos de calor se aplica el test estadístico de Fischer. Este test se utiliza para determinar si existe o no una asociación significativa entre dos variables, en este caso Tmax y Etd. La probabilidad de independencia de las dos variables se obtiene bajo la hipótesis nula de independencia. Como condición este test exige que al menos el 80% sea de las celdas de la tabla sean superiores a 5 (Pertega & Pita, 2004).

2.5. – Esquema Metodológico

Figura N° 11: Esquema Metodológico.



Fuente: Elaboración Propia.

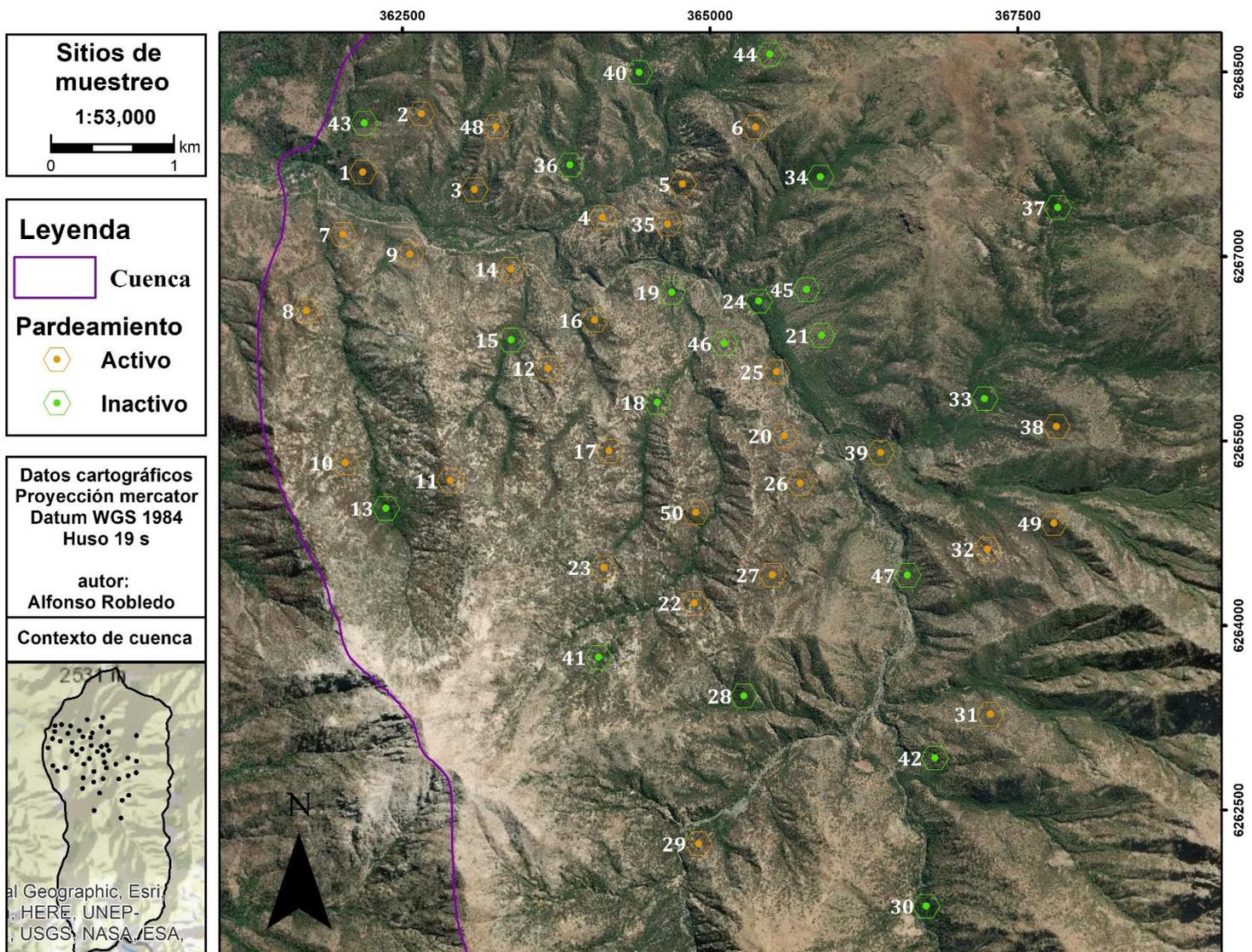
CAPÍTULO 3: RESULTADOS

3.1.- Análisis del Pardeamiento Foliar

3.1.1- Muestreo de coberturas afectadas por el pardeamiento foliar

Como primer resultado, se determinó la ubicación de los sitios de muestreo. Estos fueron seleccionados a modo de expresar una muestra representativa del fenómeno observado en el área de estudio. Posteriormente fueron extraídos los valores desde los índices NDWI y GRVI, y luego la evapotranspiración diaria desde el sensor ECOSTRESS. A continuación, la figura N°12 presenta 50 sitios de muestreo geolocalizados bajo los criterios anteriormente definidos, los cuales incluyen lugares afectados (activos en naranja) y no afectados (inactivos en verde) por el pardeamiento foliar:

Figura N° 12: Sitios de muestreo. Elaboración propia.

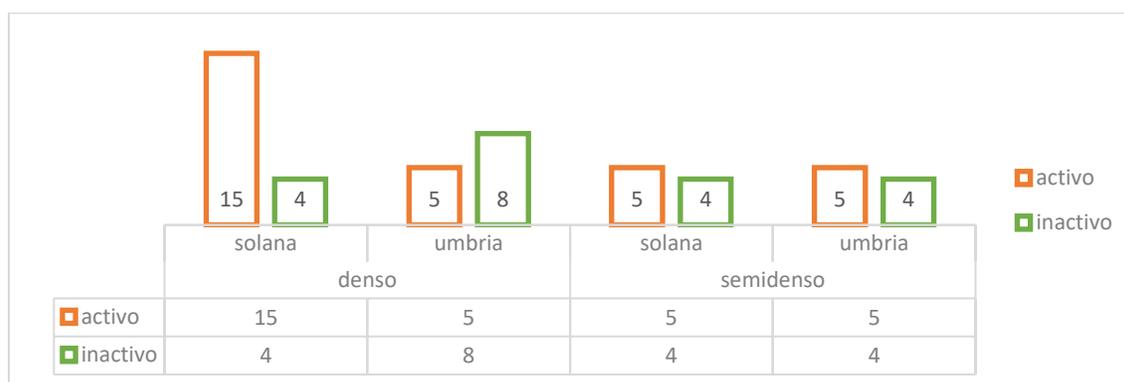


La figura N°12 expresa la distribución de los sitios de muestreo sobre las coberturas afectadas bajo efectos de pardeamiento en la cuenca del PNRC. Debido a que la mayor superficie de coberturas boscosas del PNRC se encuentra situada en la zona cercana al excretorio de la cuenca, ocupando aproximadamente el 40% del total de la superficie, los sitios fueron geolocalizados sobre estos sectores. En cuanto a la ubicación de las coberturas afectadas, se logra apreciar una clara diferencia entre laderas y fondos de quebrada, las laderas por un lado presentan la mayor cantidad de superficie afectada, al contrario, los fondos de quebradas comprenden los lugares que logran resistir a este efecto. Se seleccionó un muestreo estadístico proporcional, de manera que sea representativa a lo observado mediante el proceso de geolocalización (Figura N°8).

En total fueron seleccionados 30 sitios activos (bajo efectos de pardeamiento), de los cuales 20 corresponden a coberturas densas (15 en solana y 5 en umbría) y 10 semidensas (5 en solana y 5 en umbría). Esta selección se debe a que las coberturas densas presentan un efecto más significativo de pardeamiento, debido principalmente a su mayor composición arborea, por sobre las coberturas semidensas que incluyen matorrales y arbustos en su composición. Esta razón hace menos evidente la afectación sobre estas coberturas, sin embargo este efecto también es visible sobre estas, sobre todo en sitios que poseen composiciones mixtas arboreas y arbustivas. Esto se logra gracias al análisis satelital y la geolocalización, más las visitas en terreno.

En terminos generales se observó (Figura N°13) que el pardeamiento ha abarcado una superficie mayor sobre las coberturas de exposición norte, es decir solana (20 activos). No obstante, la exposición sur (umbría) también presenta lugares afectados (10 activos). Esta situación se invierte para los casos inactivos (8 en solana), ya que estos se encuentran mayormente bajo exposición sur (12 en umbría). Esta condición sugiere una mejor resistencia para los sectores de umbría.

Figura N° 13: Total de sitios de muestreo según sus criterios de clasificación.



En cuanto a los sitios inactivos (20 en total) estos se concentran principalmente en coberturas densas (12 sitios), a diferencia de las semidensas (8). Esta disparidad se fundamenta bajo la observación de que los casos inactivo se concentran casi exclusivamente en fondos de quebradas, siendo muy bajas las coberturas semidensas en estos sectores. Junto a ello estas además poseen una mayor concentración sobre exposiciones sur.

Dadas las condiciones observadas se estimó conveniente agrupar los sitios en estas 8 categorías para su posterior análisis. El grupo más representativo corresponde a lugares activos de coberturas densas y de exposición norte (15 sitios) (ver las características de cada sitio en la Tabla N°6) posteriormente le sigue el grupo inactivo denso de exposición sur (8). Estas muestras plantean dos escenarios opuestos frente al fenómeno de pardeamiento, por ende fueron seleccionados como los grupos mayores debido a su mayor representatividad. De esta manera los demás grupos pretenden ser una muestra fiel de lo observado tanto mediante análisis satelital. A continuación la tabla N°6 presenta en mayor detalle las características asociadas a cada sitio seleccionado.

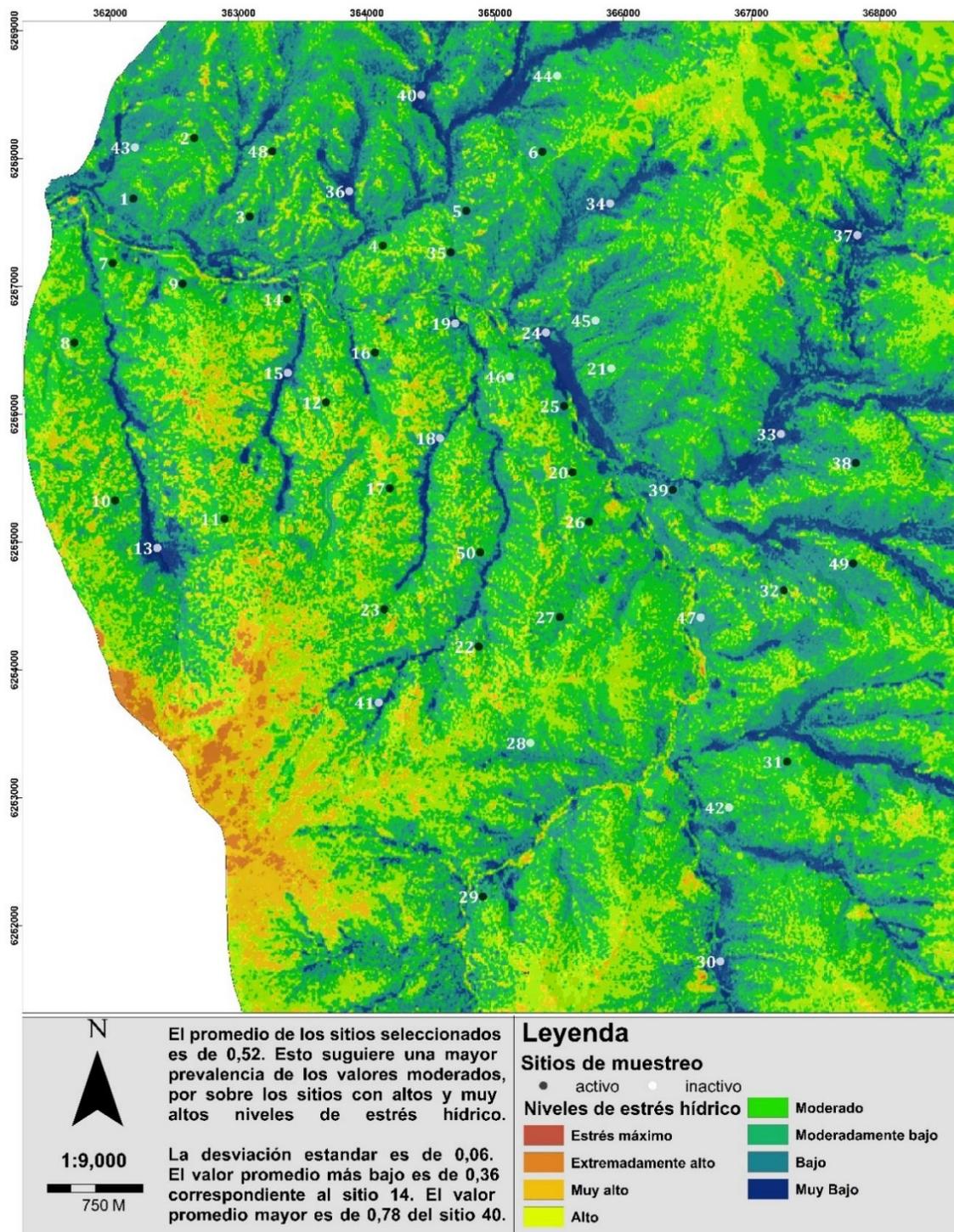
Tabla N° 6: Atributos de selección según cada sitio de muestreo. Elaboración propia.

Sitio	Pardeamiento	Cobertura	Exposición				
1	activo	denso	umbría	26	Activo	denso	solana
2	activo	semidenso	umbría	27	Activo	denso	solana
3	activo	denso	umbría	28	inactivo	denso	umbría
4	activo	semidenso	solana	29	activo	denso	umbría
5	activo	denso	umbría	30	inactivo	denso	solana
6	activo	denso	Solana	31	activo	semidenso	solana
7	activo	denso	solana	32	activo	denso	solana
8	activo	denso	solana	33	inactivo	denso	umbría
9	activo	denso	solana	34	inactivo	denso	umbría
10	activo	denso	solana	35	activo	denso	umbría
11	activo	semidenso	solana	36	inactivo	denso	umbría
12	activo	semidenso	solana	37	inactivo	denso	umbría
13	inactivo	denso	solana	38	activo	denso	solana
14	activo	semidenso	solana	39	activo	denso	solana
15	inactivo	semidenso	solana	40	inactivo	denso	umbría
16	activo	semidenso	umbría	41	inactivo	semidenso	solana
17	activo	denso	solana	42	inactivo	semidenso	umbría
18	inactivo	denso	umbría	43	inactivo	semidenso	umbría
19	inactivo	denso	umbría	44	inactivo	semidenso	solana
20	activo	denso	umbría	45	inactivo	semidenso	umbría
21	inactivo	semidenso	umbría	46	inactivo	semidenso	solana
22	activo	denso	solana	47	inactivo	denso	solana
23	activo	denso	solana	48	activo	semidenso	umbría
24	inactivo	denso	umbría	49	activo	semidenso	umbría
25	activo	denso	solana	50	activo	semidenso	umbría

3.1.2- Dinámica espacio temporal del contenido de humedad.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis del índice NDWI. Mediante este se logró estimar el contenido de humedad para la superficie total del PNRC, incluidos los sitios de muestreo. Los valores cercanos a 1 indican un mayor contenido de humedad, mientras que los valores más bajos indican lo contrario. El valor promedio para todos los sitios de muestreo es de 0.54. Junto a esta aplicación, este índice se utilizó para estimar los niveles de estrés hídrico.

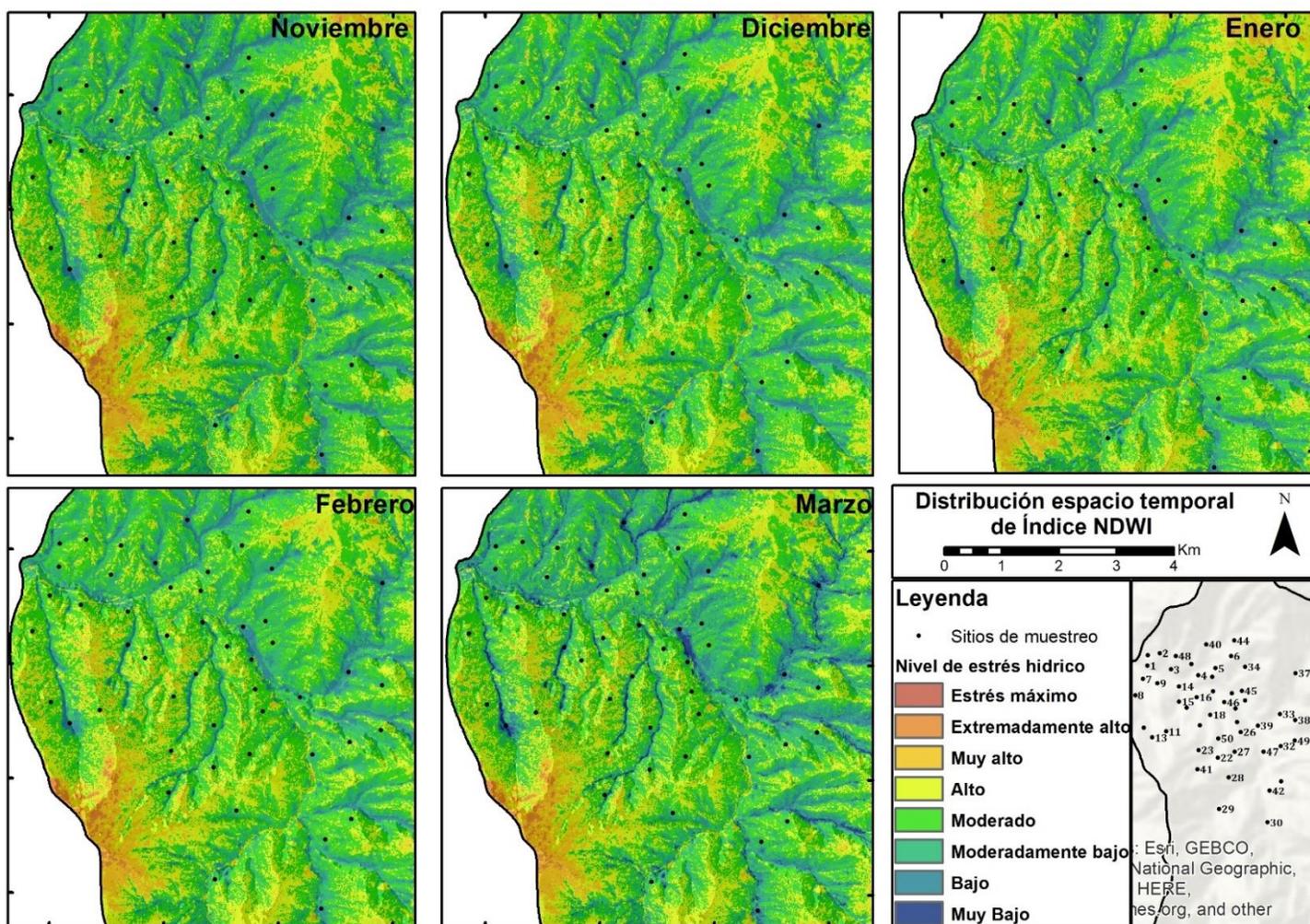
Figura N° 14: Distribución espacial del contenido de humedad NDWI. Elaboración propia



Como primera observación se destaca una gran concentración del contenido de humedad sobre los fondos de quebradas. Resulta muy evidente cómo estas características son restringidas únicamente a estos sectores, siendo justamente donde se ubican la mayoría de los sitios sin efectos de pardeamiento (0,61 promedio). Estas zonas registran los niveles bajos y muy bajos de estrés hídrico, siendo muy favorables para retener las condiciones de humedad. Luego, se observa cómo por medio de las laderas los niveles de humedad disminuyen progresivamente, desde niveles moderadamente bajos hasta los extremadamente altos en las altas cumbres. Estos sectores comprenden la mayoría de los sitios con pardeamiento activo, resultando en total, veintidós moderadamente bajos (0,53 promedio), quince moderados (0,45 promedio) y dos altos (0,36 promedio).

Cabe destacar una leve variación entre los sectores orientales y occidentales del Río Clarillo, en donde los primeros presentan mayores niveles de humedad, esto se asocia principalmente a que esta vertiente posee laderas de exposición sur. En cambio, las vertientes orientales presentan menores niveles de humedad, siendo esta vertiente mayormente de exposición norte. A continuación, se presenta la figura N°15, para seguir un análisis temporal para NDWI:

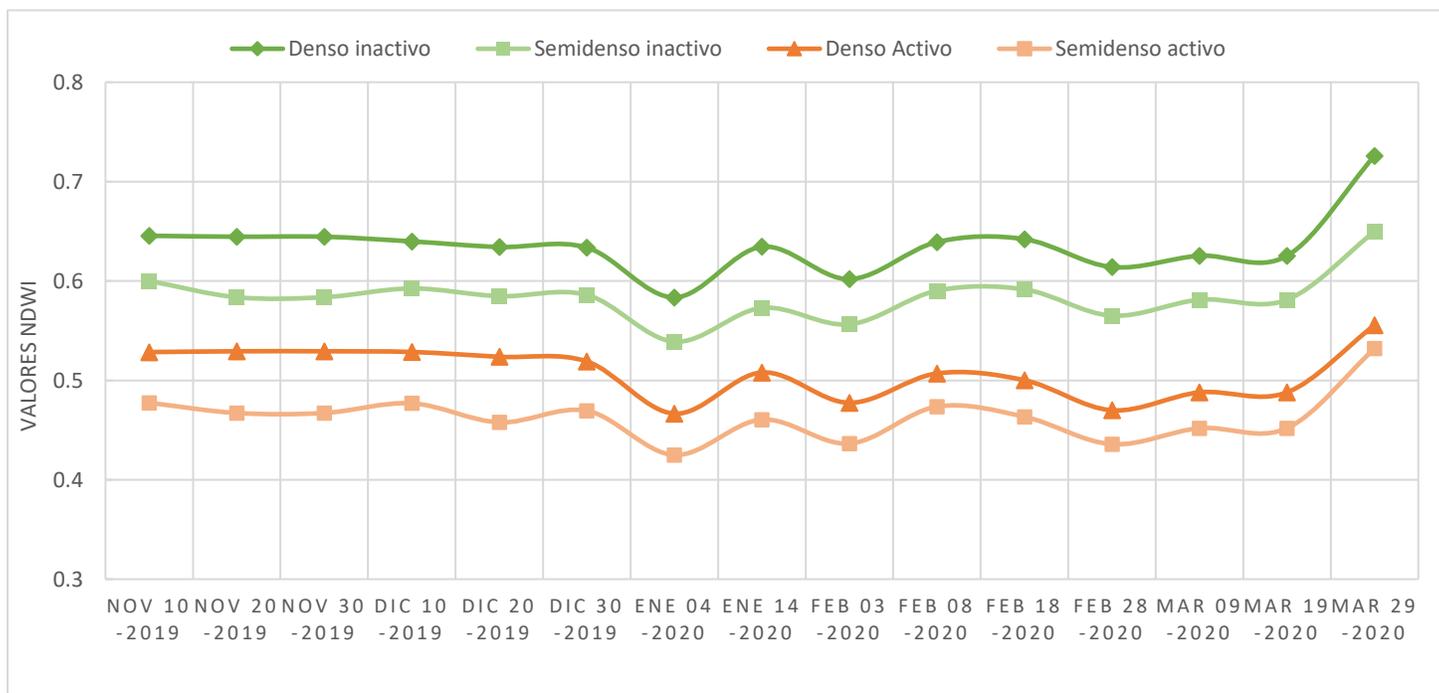
Figura N° 15: Distribución espacio temporal del índice NDWI. Elaboración propia.



En términos generales no existe una gran variación espacio temporal para la distribución del contenido de humedad (Figura N°15). Más bien esta presenta una dinámica clara, en la cual se mantiene cierta constante en los niveles de estrés hídrico. Se observa un decaimiento tenue de los niveles moderados (sobre laderas), y un leve avance de los niveles altos descendiendo por las laderas. Los sectores de fondos de quebrada, de niveles moderado-bajos y bajos, mantuvieron una leve baja hasta febrero, donde NDWI alcanzo 0,62 promedio. Sin embargo, en marzo (0,71) estos valores incrementaron por sobre el promedio total de los meses, lo cual indica una recuperación general.

Para los sectores con niveles altos de estrés hídrico, se observa cómo estos descienden de las altas cumbres hacia las laderas, hasta el mes de febrero, donde alcanza su fase máxima, la cual no obstante no alcanza los sitios de muestreo bajo niveles moderados. Se logra distinguir que la fase más crítica corresponde a los meses de enero y febrero, con una baja variación espacial. A continuación, se presenta en mayor detalle las diferencias del contenido de humedad de los sitios de muestreo, según sus criterios de clasificación.

Figura N° 16: Dinámica temporal del contenido de humedad según coberturas. Elaboración propia.



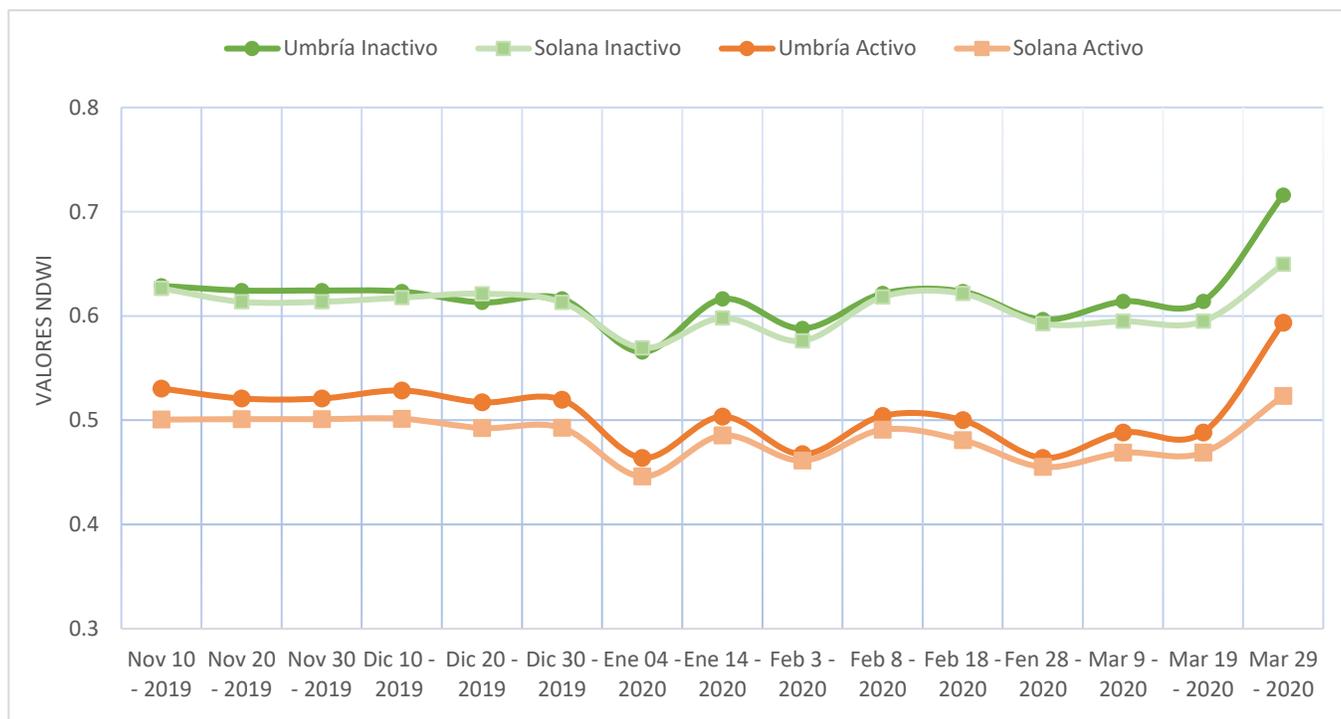
Mediante la figura N°16 se logra reinterpretar la variación del contenido de humedad durante el periodo de estudio. A diferencia de la figura N°15 se logra apreciar con mayor detalle las diferencias del contenido de humedad entre sitios activos (0,49 promedio) e inactivos (0,63), según sus coberturas. Los sitios activos oscilan entre los niveles moderado y alto de estrés hídrico, por otro lado, los lugares inactivos oscilan sobre niveles moderados y bajos. Esta dinámica tiene su punto de inflexión en el mes de enero, donde se produce una baja general que se prolonga hasta fines de marzo (Mar 29-2020).

En general las coberturas muestran cierta similitud temporal entre lugares activos en inactivos, no obstante, con diferentes niveles del contenido de humedad. Los sitios activos con coberturas densas (0,50 promedio) y semidensas (0,46 promedio) presentaron los valores más bajos, correspondientes a los niveles moderados de estrés hídrico, por otro lado, los sitios inactivos denso (0,63 promedio) y semidensos (0,58 promedio), presentaron una dinámica similar, sin embargo, sobre niveles bajos y moderados. Por tanto, los lugares con pardeamiento activo presentan menores contenidos de humedad con respecto a los inactivos, independientemente de su cobertura.

Por otro lado, se observa una dinámica similar entre los tipos de coberturas. Los sitios con coberturas semidensas presentaron menores contenidos de humedad, en relación con las coberturas densas. No obstante, los sectores sin efectos de pardeamiento semidensos (0,58 promedio) poseen mayor contenido de humedad que los sitios con coberturas densas (0,50) en lugares activos, esto sugiere una gran importancia a la ubicación con respecto al contenido de humedad.

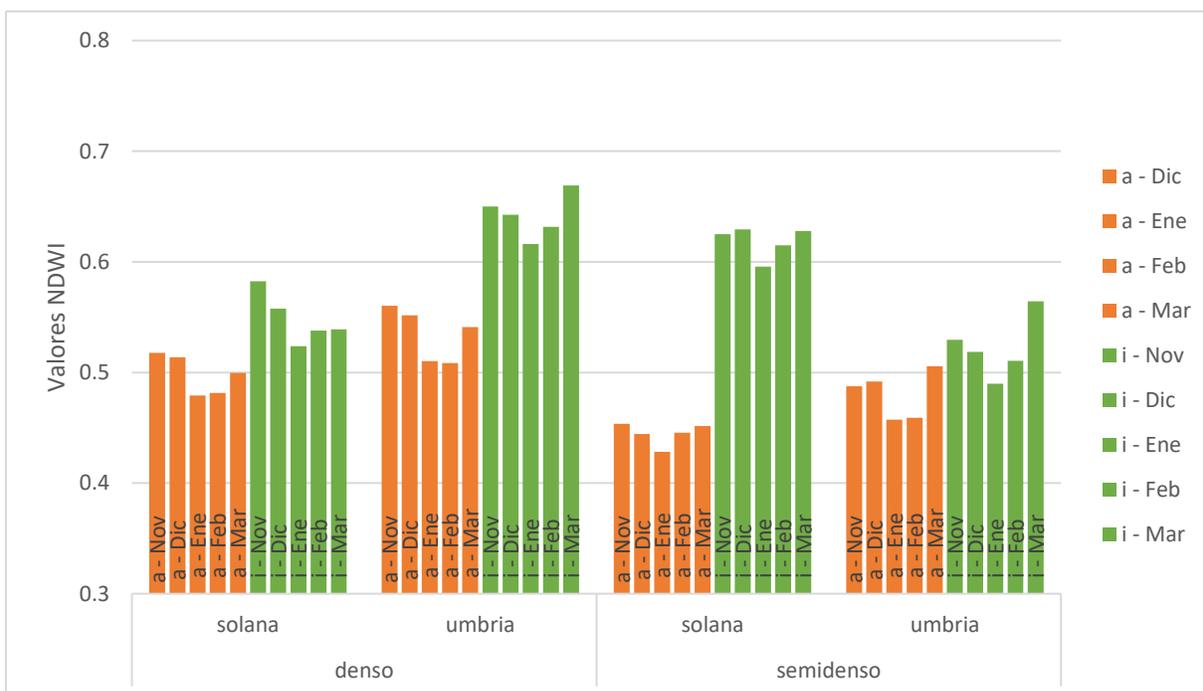
En cuanto a la dinámica temporal, esta demuestra cierta constancia en paralelo para todos los sitios. Durante los meses de noviembre y diciembre la curva mantuvo cierta constancia. Luego los meses de enero, febrero y marzo se presentan como los periodos más críticos, manifestándose una oscilación con cuatro periodos con descensos progresivos (4-ene, 3, 18, y 28 feb) y dos de recuperación (14-ene y 18-feb). Para inicios del mes de marzo se observa una leve recuperación constante, hasta finales de marzo que se ilustra una recuperación exponencial.

Figura N° 17: Dinámica temporal del contenido de humedad según exposición. Elaboración propia.



La figura N°17 expresa la dinámica temporal del contenido de humedad según su exposición solana (norte) y umbría (sur). En esta se mantienen ciertas constantes, al igual que la figura anterior, la diferencia porcentual entre los lugares activos e inactivos y la misma dinámica temporal, no obstante, en esta figura se distingue cómo el contenido de humedad presenta la curva al mismo nivel, con muy leves variaciones entre solana y umbría, tanto bajo lugares con pardeamiento activo (0,01 de diferencia promedio) e inactivo (0,02 de diferencia promedio). Esto resulta interesante y sugiere una mayor relevancia a los tipos de coberturas en cuanto a la variación del contenido de humedad.

Figura N° 18: Evolución temporal del contenido de humedad según grupos de muestreo.
Elaboración propia.

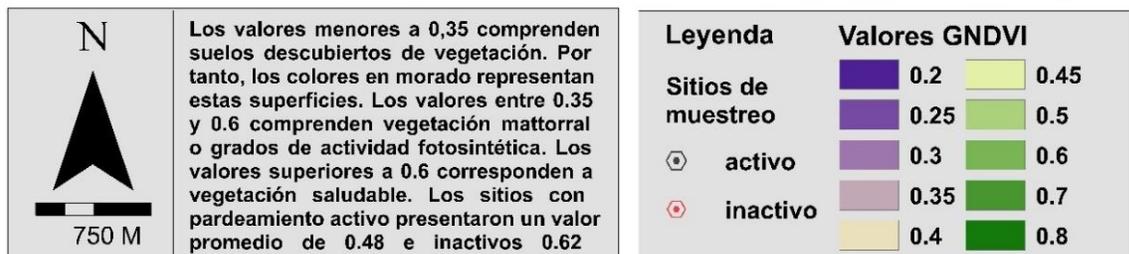
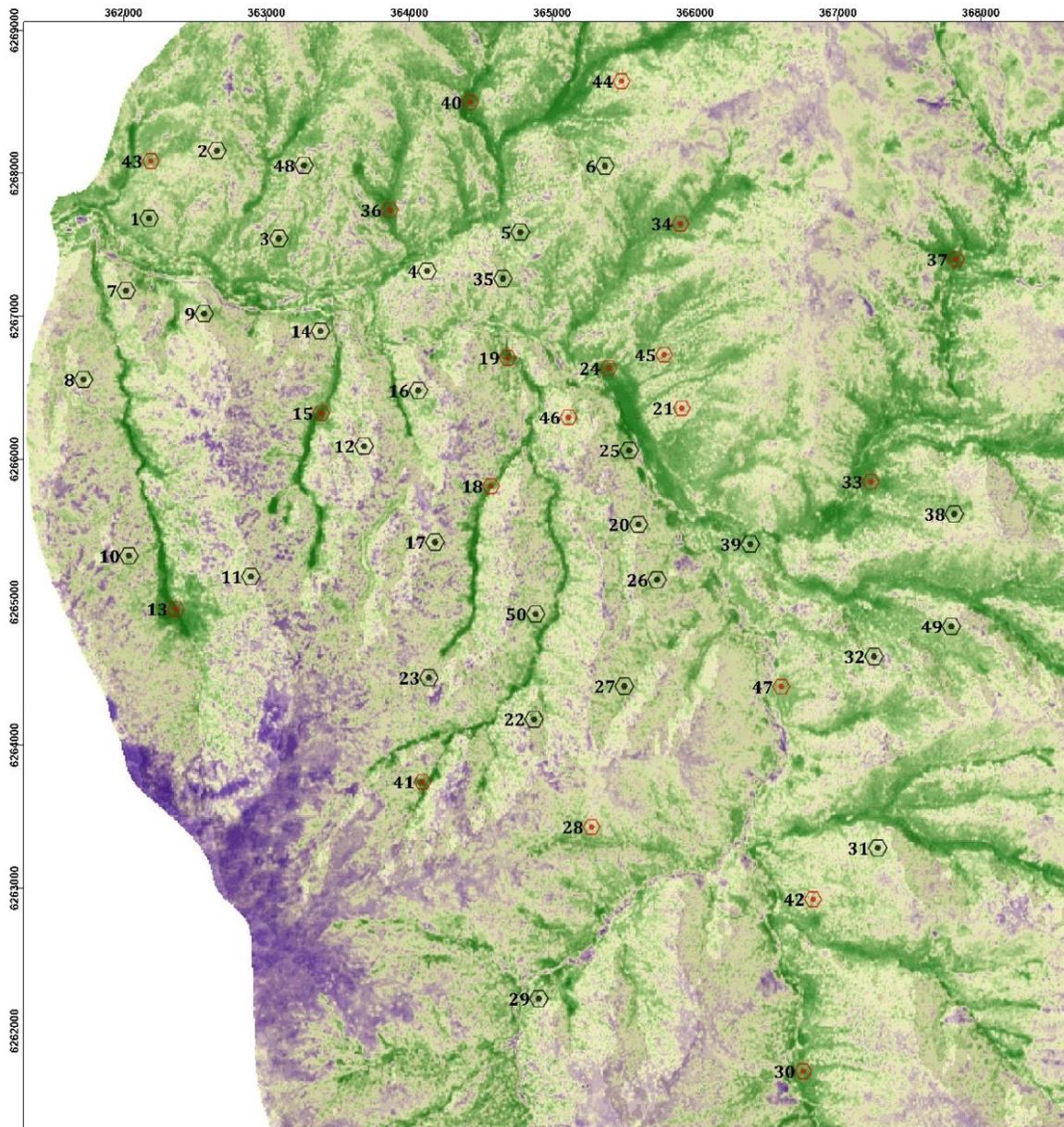


La figura N°18 ilustra la composición del contenido de humedad para las variables de manera agrupada, en naranja los grupos activos y en verde los inactivos. Se distingue cómo el grupo semidenso de exposición solana presenta la mayor diferencia entre sitios activos (0.44) e inactivos (0.61), siendo este el que presentó la mayor variación del contenido de humedad, cabe destacar que los valores inactivos de este grupo se presentan de manera similar al grupo inactivo denso umbría (0.64), lo cual se debe a que estos sitios se fueron seleccionados sobre fondos de quebradas en su mayoría, y a su vez sugiere una mayor sensibilidad al contenido de humedad. A su vez el grupo semidenso umbría presenta una leve diferencia porcentual, pero con valores muy similares al grupo denso solana. En cuanto a la evolución temporal, se observa de manera similar con respecto a las figuras anteriores, esto es una baja generalizada para los meses de enero y febrero, y una recuperación en marzo.

3.1.3.- Estimación de la pérdida foliar mediante el índice GNDVI

A continuación, se presentan los resultados del análisis del índice de Vegetación Verde de Diferencia Normalizada (GNDVI). La figura N°19 expresa la distribución espacial del contenido de clorofila en el área de estudio, junto a la ubicación de los sitios de muestreo.

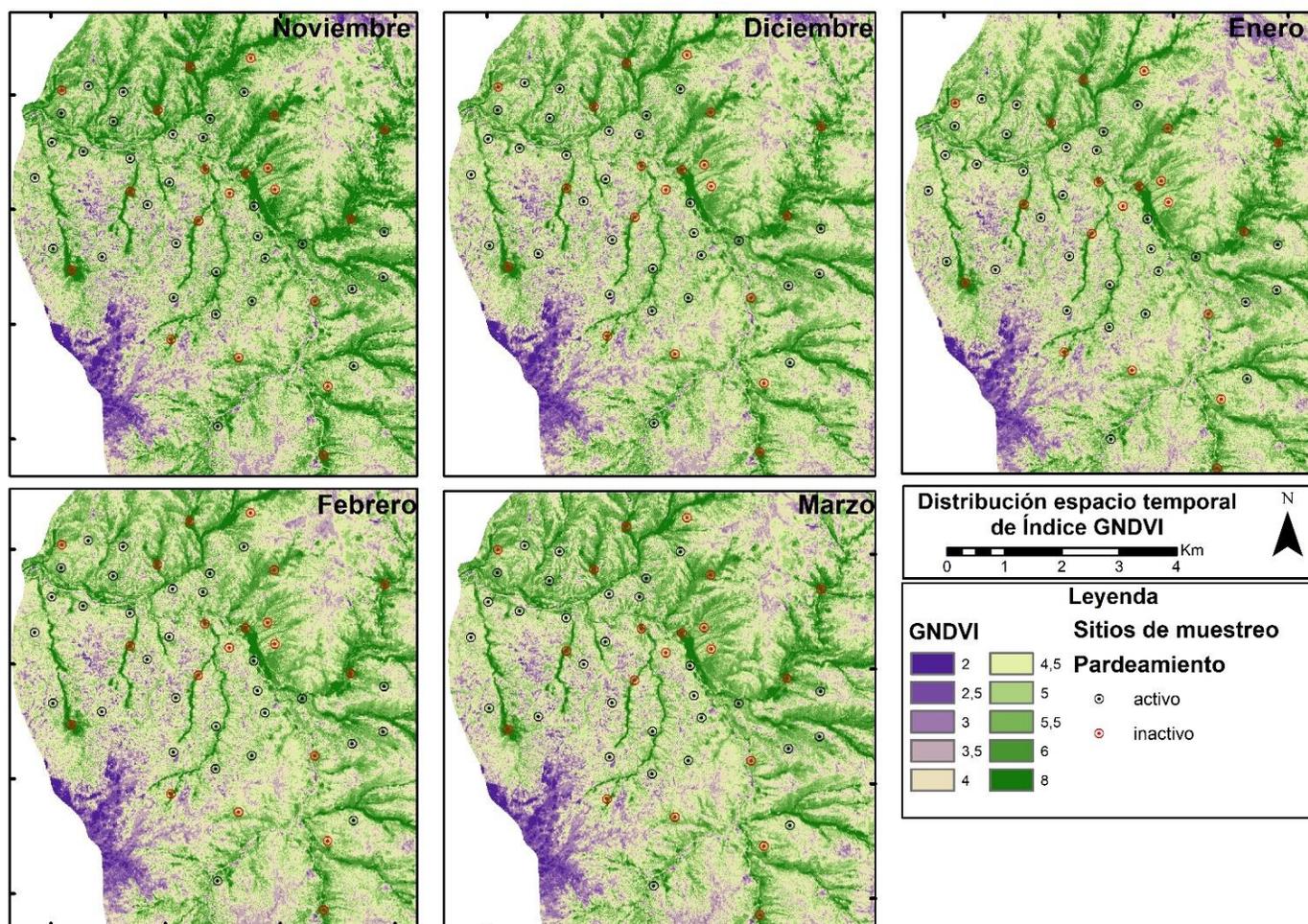
Figura N° 19: Distribución espacial del verdor de la vegetación GNDVI. Elaboración propia.



A partir de los valores GNDVI se logra diferenciar la concentración de clorofila, así como también de biomasa en el área de estudio. Como se explica en la figura N°19, los valores menores a 0.35 corresponden a suelos descubiertos de vegetación (tonos morados). Entre 0.35 y 0.6 comprende vegetación semidensa, y sobre 0.6 vegetación densa en un estado saludable. En este sentido se destaca las concentraciones de clorofila sobre los sectores de fondos de quebradas, siendo los únicamente estos sectores que concentran estos niveles de vegetación saludable. Algunas laderas de orientación sur también presentan mayores contenidos de clorofila, a diferencia que las laderas de exposición norte donde se registran valores menores.

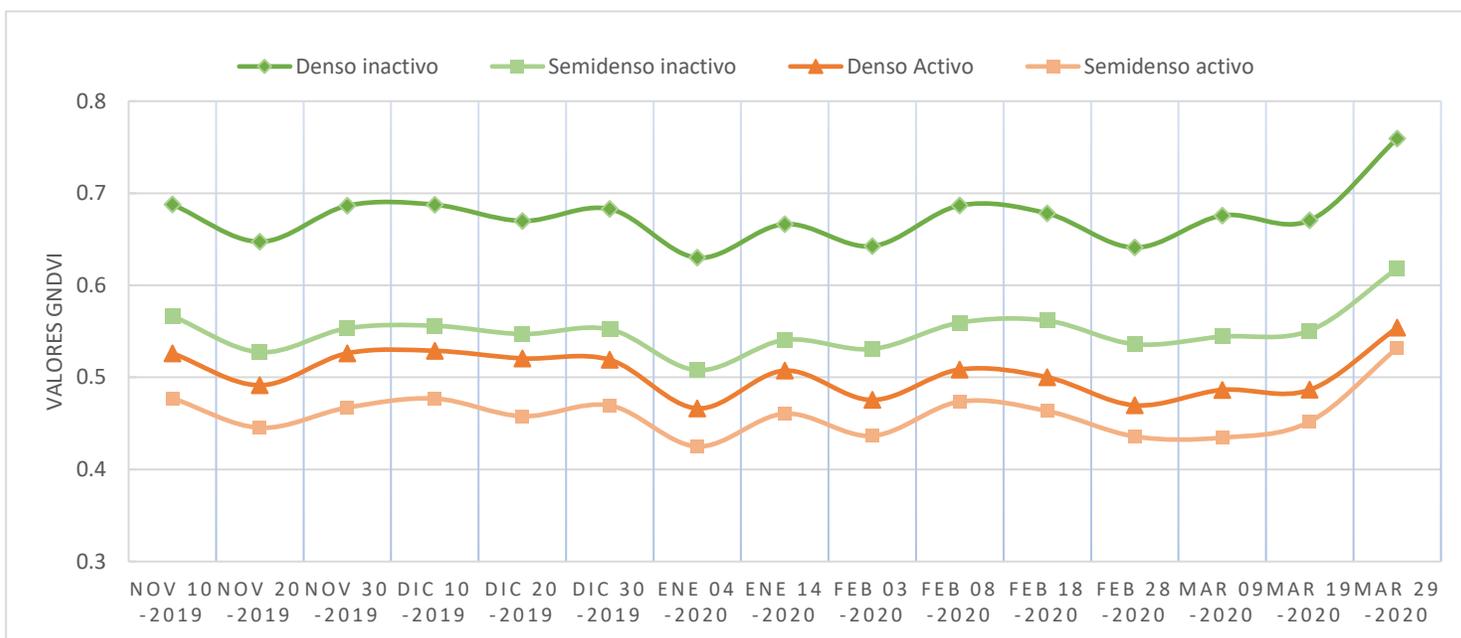
En cuanto a los sitios de muestreo, se observa de manera general que los sitios activos se presentan sobre valores intermedios (0.48 promedio), a diferencia de los sitios inactivos que presentan valores elevados (0.62 promedio). Esta diferencia se presenta de manera general como gradiente en relación con la distancia del fondo de quebrada, es decir, los lugares más distantes presentan valores GNDVI menores. Esta situación se expresa a través del sitio 24 (0.79), que posee el mayor valor promedio, siendo este un lugar denso de exposición umbría y de pardeamiento inactivo. Al contrario, el sitio 11 (0.41) semidenso de exposición solana, posee uno de los valores más bajos.

Figura N° 20: Distribución espacio temporal del índice GNDVI. Elaboración propia.



En cuanto a la variación espacio temporal, se logra observar un decaimiento paulatino de los tonos verdes oscuros a colores más claros, desde las laderas hacia los fondos de quebradas. Esto sigue una baja en la actividad fotosintética de la cubierta vegetal tanto densa como semidensa. Esta tendencia actúa de manera progresiva hasta el mes de febrero, el cual presenta los menores valores promedio. En términos generales se observa que la mayor variación del contenido clorofila se concentra sobre las zonas intermedias de verdor, esto sobre las coberturas que se encuentran sobre laderas, es justamente sobre estos sectores donde se ubican los sitios de muestreo con efectos de pardeamiento activo. Al contrario, los fondos de quebradas no presentan mayores variaciones, sobre estos sectores se ubican los sitios inactivos. A continuación, se presenta en mayor detalle mediante la siguiente figura.

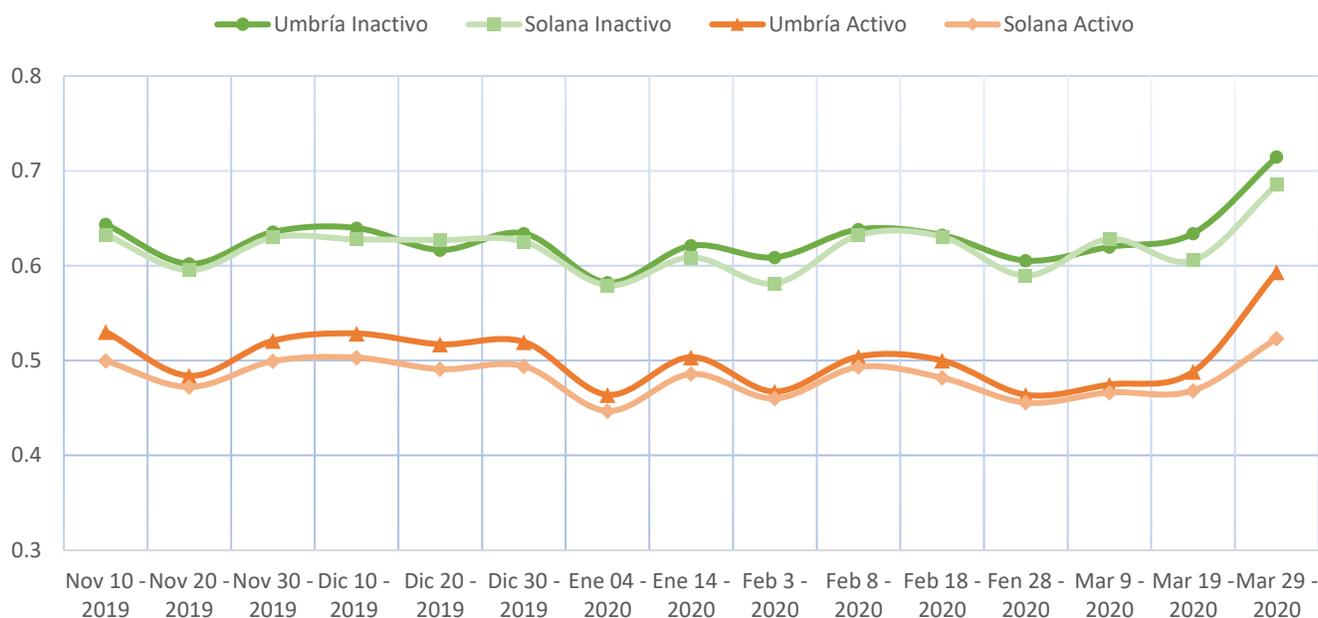
Figura N° 21: Dinámica temporal del índice GNDVI según coberturas boscosas.
Elaboración propia.



La figura N°21 grafica los valores GNDVI de acuerdo con los sitios de muestreo según sus coberturas. En color verde los sitios con pardeamiento inactivo y naranja los sitios activos. Como primera observación, se distingue una condición saludable del verdor para las coberturas densas inactivas (sobre 0.6). Por otro lado, las cubiertas densas activas presentan valores intermedios del verdor, incluso menores que las coberturas semidensas inactivas. Esta diferencia denota una afectación del verdor sobre las coberturas densas, siendo por tanto más sensibles a los efectos de pardeamiento que las coberturas semidensas.

En cuanto a la evolución temporal, esta no presenta una gran variabilidad para los tipos de sitios de muestreo, más bien se observa una dinámica paralela durante el periodo de estudio. Cabe mencionar que se reitera (al igual que para NDWI) los meses de enero y febrero como las fases más críticas en el decaimiento del verdor.

Figura N° 22: Dinámica temporal del índice GNDVI según exposición. Elaboración propia.



La figura N°22 representa la dinámica del verdor durante el periodo de estudio según la exposición (Solana y umbría) de los sitios de muestreo. Al igual que NDWI, esta presenta una respuesta similar del contenido de verdor de acuerdo con la exposición. Esta presenta clara diferencia entre los sitios activos e inactivos, donde los primeros se encuentran sobre valores saludables y los segundos presentan una respuesta intermedia. Junto a ello, los sitios no presentaron variaciones importantes entre sitios umbría y solana en cuanto al contenido de clorofila. Esto denota una mayor relevancia al criterio de cobertura por sobre exposición frente al efecto de pardeamiento foliar.

3.1.3. Correlación y significancia estadística entre índices espectrales

Teniendo presente la similitud de los resultados de los índices NDWI y GNDVI, se presenta a continuación la correlación entre estos dos en cuanto a los criterios según sitios de muestreo.

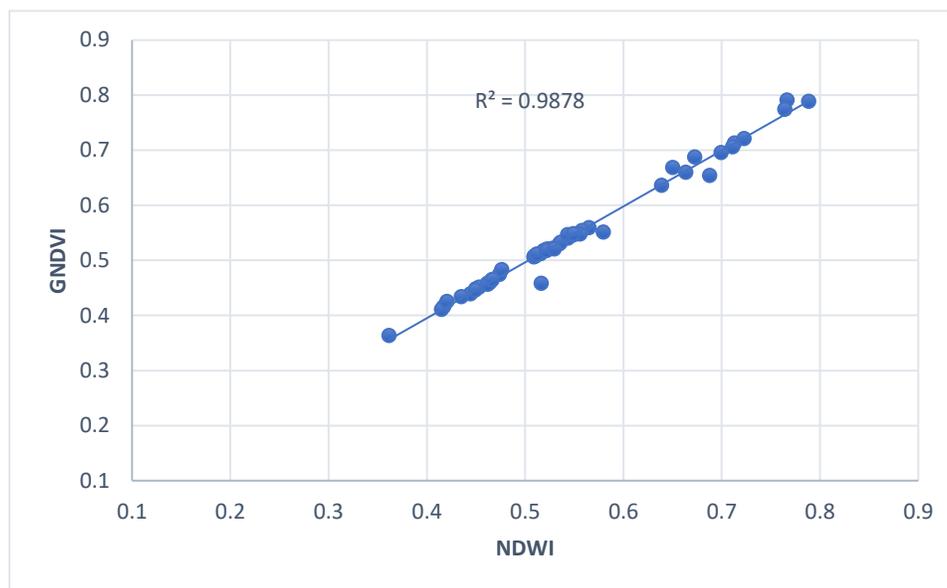
Tabla N° 7: Coeficiente r y r² de entre índices NDWI y GNDVI. Elaboración propia.

	Nov-10	Nov-20	Nov-30	Dic-10	Dic-20	Dic-30	Ene-04	Ene-14	Feb-03	Feb-08	Feb-18	Feb-28	Mar-09	Mar-19	Mar-29
r	0.98	0.95	0.97	0.96	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96	0.95	0.93	0.99	0.97
r²	0.95	0.90	0.94	0.93	0.92	0.85	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92	0.91	0.87	0.93	0.93

De acuerdo con lo observado en la tabla N°7 se presentó una “r” positiva muy fuerte entre los índices (0.96 promedio), luego, “r²” tuvo un valor igual 0.91 promedio, es decir posee una capacidad predictiva del 91%. Estos resultados sugieren una fuerte relación entre el contenido de humedad (NDWI) y la salud vegetal (GNDWI).

De acuerdo con la figura N°23 se observa una alta correlación lineal positiva. Se observa un leve grado de dispersión de los sitios de muestreo. Junto a ello se logra observar una separación entre los valores superiores a 0.6. Este valor se presenta como umbral para los sitios activos e inactivos para los dos índices.

Figura N° 23: Grafico de dispersión y relación entre GNDVI y NDWI.



De acuerdo los resultados arrojados por la prueba de T de Student, como primer resultado de la relación de significancia entre GNDVI y NDWI no presentó diferencia estadísticamente significativa (Tabla N°8). Este resultado resulta interesante ya que da cuenta de la relación entre ambas variables (verdor y contenido de humedad).

Tabla N° 8: Resultados de la prueba de T de Student.

<i>Muestras</i>	<i>p-valor</i>	<i>Rechazo Ho (p-valor<α)</i>
<i>NDWI - GNDVI</i>	0,84	No
<i>NDWI activo – NDWI inactivo</i>	0,006	Si
<i>GNDVI activo – GNDVI inactivo</i>	0,005	Si

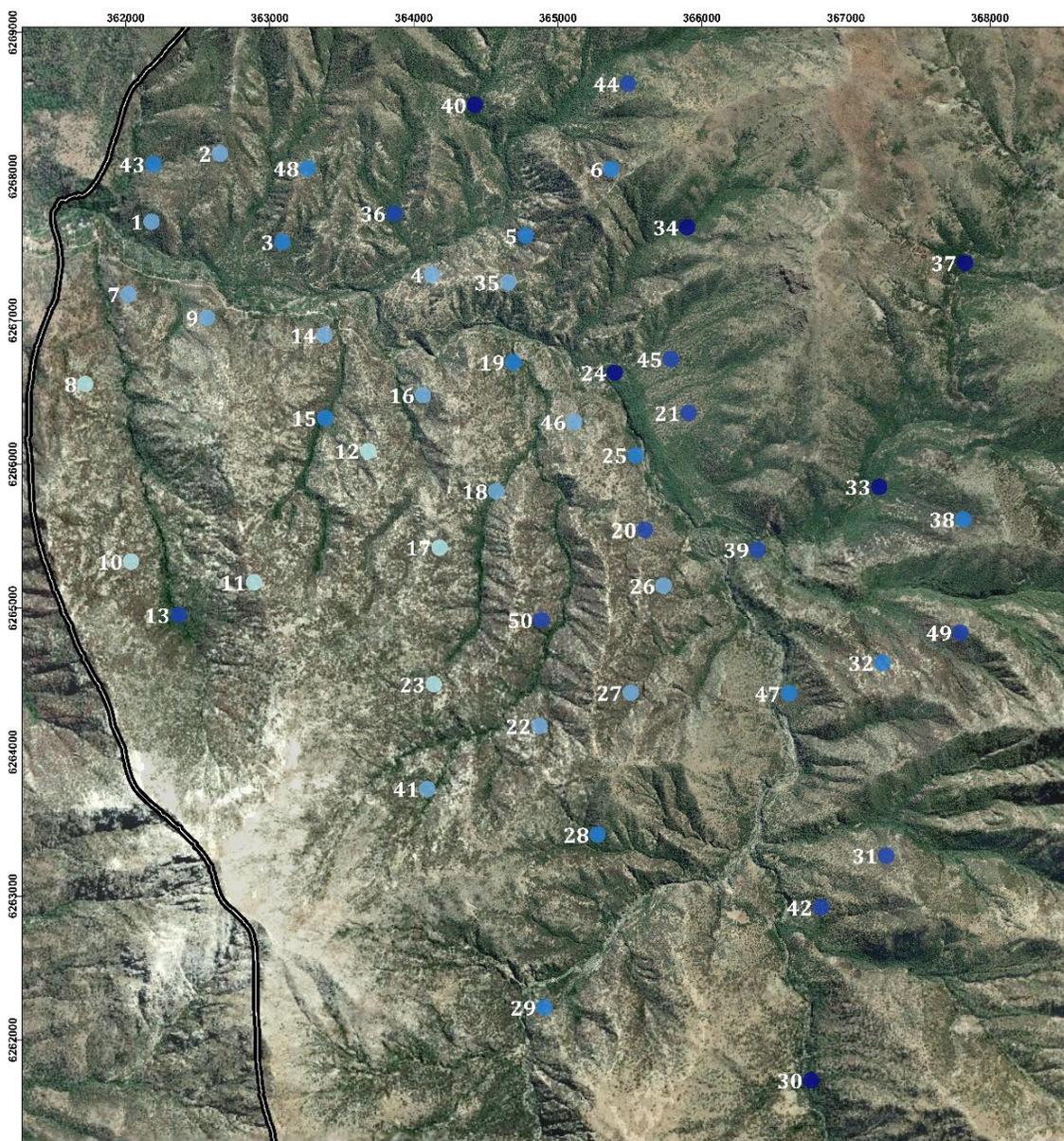
Sin embargo, para la significancia estadística entre los sitios con pardeamiento activo e inactivo, estos sí presentaron diferencia estadísticamente significativa (Tabla N°8). Esto sugiere una diferencia sustancial para los sitios activos e inactivos, tanto en contenido de humedad como la actividad fotosintética.

3.2 Análisis microclimático

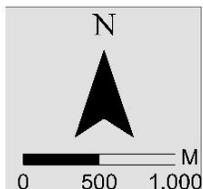
A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis microclimático, en términos de la relación entre de la evapotranspiración y los eventos extremos de calor (olas de calor) en los sitios de muestreo del área de estudio.

3.2.1. Dinámica espacio temporal de la Evapotranspiración

Figura N° 23: Distribución espacial de la Evapotranspiración promedio mensual.
Elaboración propia.



Evapotranspiración promedio mensual	
mm	
137 - 150	●
150 - 168	●
168 - 187	●
113 - 122	●
122 - 137	●



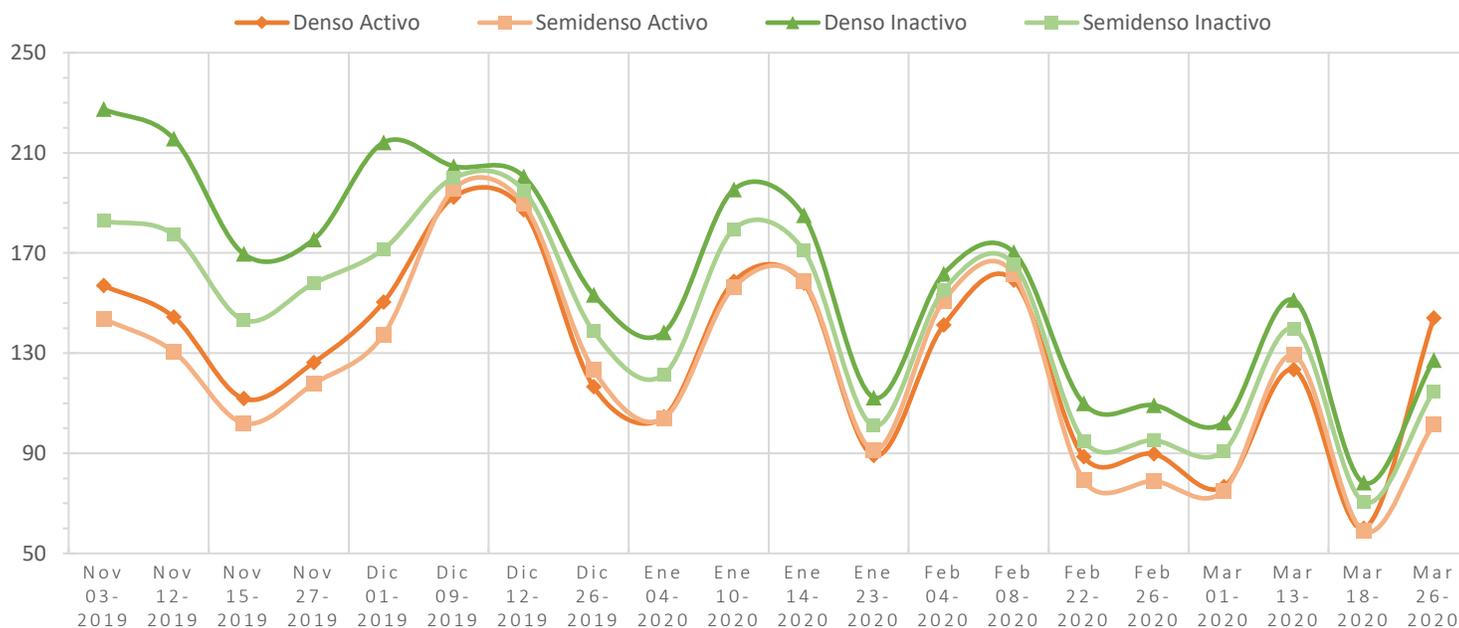
Los puntos presentes corresponden a los sitios de muestreo, desde los cuales fueron extraídos los valores de ETd. Esta muestra corresponde al promedio general del periodo de estudio. Los valores han sido expresados en mm x mes. El valor promedio es de 145 mm. El sitio n° 8 presentó el menor valor promedio (112), por otro lado, el sitio n° 37 el promedio máximo (186).

La figura N°23 presenta la distribución de la evapotranspiración (Et) promedio mensual en los sitios de muestreo. Los sectores que presentaran los valores más bajos de Et se representan en la paleta con los tonos más claros, y más oscuros mayor contenido de Et. El espectro de variabilidad oscila entre los 50 mm a 250 mm, con una desviación estándar promedio de 40 (mm) por sitios. Esta variabilidad entre los lugares se expresa en forma de gradiente desde las zonas más altas y alejadas de fondos de quebrada, donde lo sitios con menor evapotranspiración (8, 10, 11, 12 17, 22, 23, 27, por ejemplo) se encuentran en zonas tanto densas como semidensas, alejadas de fondos de quebradas. Al contrario, los sitios con valores mayores (13, 15, 21, 24, 30, 37, 44, por ejemplo) se encuentran sobre los fondos de quebradas. Esta diferencia se manifiesta entre los sitios con pardeamiento activo (127 mm promedio mensual) e inactivo (153 mm promedio mensual).

En cuanto a la distribución de Et, en términos generales se observa una concentración de baja Et sobre las laderas de exposición norte, en la vertiente occidental del río clarillo. Los lugares con valores intermedios se presentan sobre laderas de exposición sur, por la vertiente norte del río clarillo. Los valores máximos se ubican sobre los fondos de quebradas, y cercanas al cauce del río. Esta diferencia representa la variabilidad espacial de Et en la cuenca. A modo de analizar esta variabilidad con mayor detalle, se presenta a continuación las figuras de variabilidad temporal según cobertura y exposición.

Cabe agregar mediante el cálculo de correlación de Pearson ($r = 0,75$) se comprueba una relación significativa entre los datos obtenidos desde el satélite ECOSTRESS y la estación meteorológica río clarillo, resultandos representativos estos valores a la variabilidad espacio temporal de la Et del área de estudio.

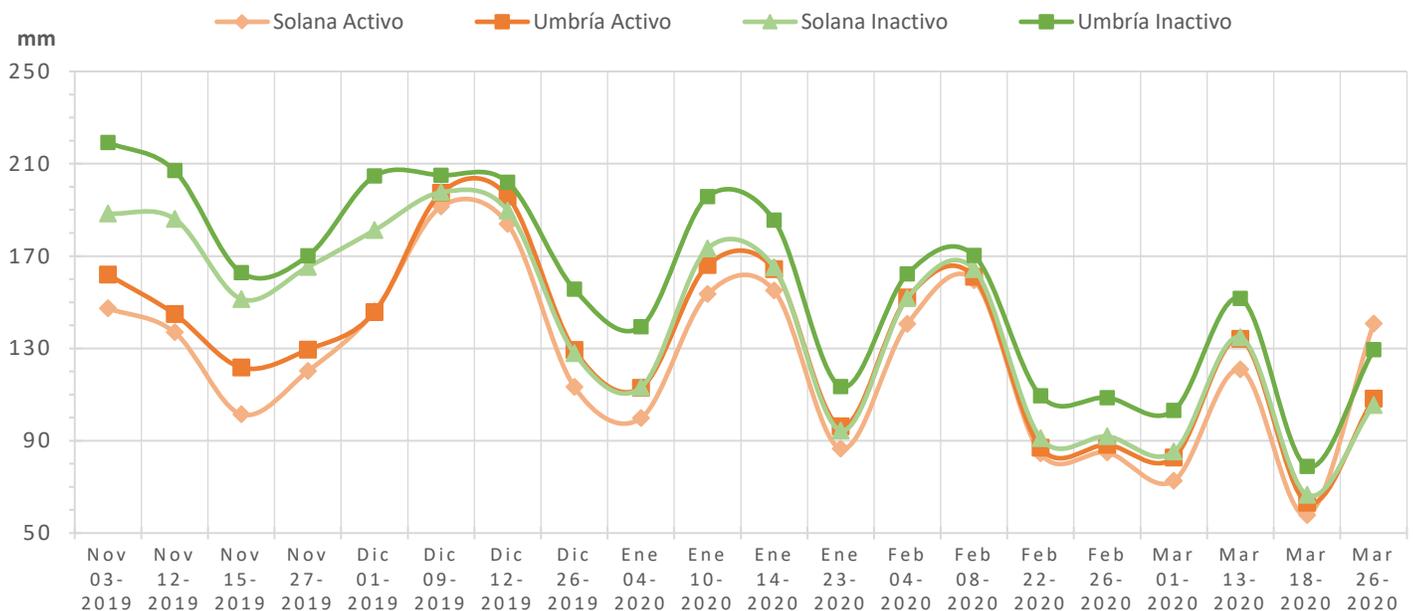
Figura N° 24: Dinámica temporal de la evapotranspiración promedio mensual según coberturas boscosas. Elaboración propia.



Mediante la figura N°25 se presenta la dinámica temporal de la Et promedio mensual entre sitios con pardeamiento activo e inactivo según sus coberturas boscosas. En esta se observa que durante los primeros meses del periodo de estudio (nov 03 y dic 09) la diferencia entre estos es muy superior con respecto a los meses posteriores. Esto sigue una agudización o decrecimiento entre sitios activos e inactivos, la cual se expresa en la tendencia de la curva para el periodo de estudio de la Et. Pese a esta disminución de los sitios inactivos, se mantiene una disconformidad regular entre las curvas inactiva-verde (157 mm promedio) y activa-naranja (127 mm promedio), solo en marzo se presenta un incremento superior de los sitios activos.

Se observa que la curva presenta oscilaciones con variaciones de 100 mm aproximadamente, la cual se prolonga de esta manera durante todo el periodo de estudio, con una disminución constante en los valores promedio para cada grupo de sitios de muestreo. Esta dinámica presenta una variabilidad representativa constante de la evapotranspiración con respecto a las coberturas boscosas.

Figura N° 25: Dinámica temporal de la evapotranspiración promedio mensual según exposición. Elaboración propia.



Con respecto a la variación temporal de la Et según exposición, la figura N°26 expresa la dinámica extraída desde los sitios de muestreo. Esta se expone de forma semejante a la figura N°25, con una amplia variabilidad constante durante el periodo de estudio, sin embargo, en este caso se logra distinguir una mayor cercanía entre los sitios activos (130 mm promedio) e inactivos (145 mm promedio), donde las curvas inactiva-verde y activa-naranja presentan mayor proximidad, esto demuestra una menor variación de la Et de según la exposición de

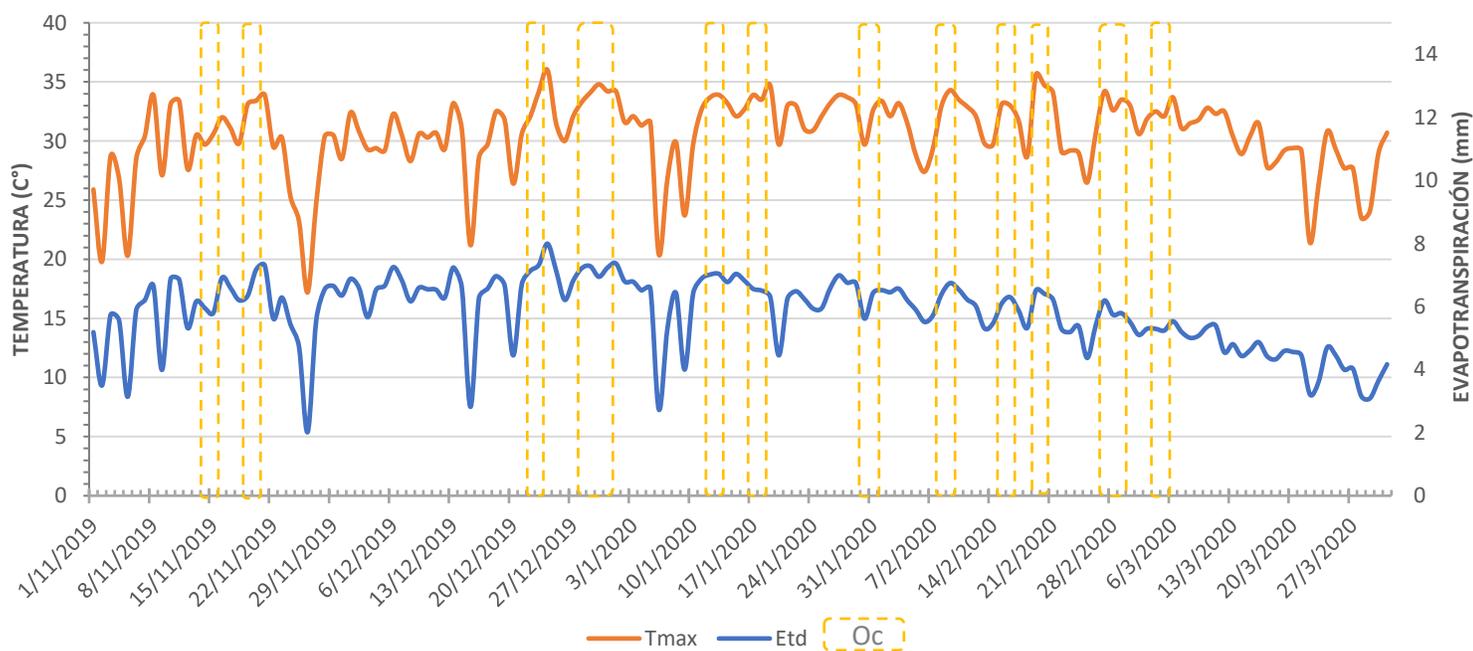
los sitios de muestreo. Por tanto, mediante estas figuras se expone una mayor variabilidad y oscilación de la dinámica de la Et según las coberturas boscosas por sobre la exposición.

3.2.2.- Relación temporal entre la evapotranspiración y los eventos de calor extremo

Como primer resultado se presenta el coeficiente de correlación de Pearson entre la evapotranspiración diaria (ETd) de temperatura máxima diaria (Tmax) de la estación Río Clarillo. Esta presentó un valor significativo ($r = 0.84$). Esta confinidad confirma la estrecha relación entre estas variables a nivel microclimático del ecosistema.

En cuanto a los eventos extremos de calor durante el periodo de estudio, se presentó un total de doce periodos (48 días en total). Estos se presentaron de manera progresiva, noviembre (6 días), diciembre (7 días), enero (8 días), febrero (13 días) y marzo (4 días). Los meses de enero y febrero presentaron la mayor cantidad de Oc y los promedios más altos de temperatura (31,5 y 31,7 respectivamente). Para ver esto con mayor detalle se presenta el cálculo de umbrales máximos y Tmax diaria como anexo n°X. A continuación, en la figura X se presenta la dinámica temporal de Tmax en relación con la evapotranspiración. Los cuadrados en naranja corresponden a periodo de Oc.

Figura N° 26: Relación temporal entre Evapotranspiración diaria y los eventos extremos de calor durante el periodo de estudio. Elaboración propia.



Mediante la figura N°27 se logra contemplar la dinámica temporal de Tmax en naranja (temperatura máxima diaria) y la ETd en azul (evapotranspiración diaria). La curva de estas variables se presenta de forma semejante durante el periodo de estudio, es decir, actúan de manera sincrónica. Se observa que en la medida que Tmax aumenta o disminuye, de la misma manera ETd exhibe el mismo comportamiento. Esto es, a mayor temperatura, mayor es la evapotranspiración. Esta oscilación se presenta con leves variaciones durante el periodo de

estudio, presentando una variabilidad diaria en paralelo. Esta similitud es reflejo de la cercana correlación entre ambas variables.

En cuanto a la dinámica de estas variables durante periodos Oc, se observa que esta dinámica se mantiene constante, es decir, durante periodos extremos de calor la evapotranspiración aumenta o disminuye según la dinámica de la temperatura registrada durante tales periodos. Cabe mencionar que durante estos periodos la temperatura alcanza máximas que no necesariamente tan solo aumentan, sino que más bien pueden oscilar dependiendo del umbral máximo de temperatura registrado para tal periodo, por tanto, estos periodos se presentan bajo leves oscilaciones de temperatura máxima. Por tanto, el registro de estas altas temperaturas está directamente relacionado con el incremento de máximas en la evapotranspiración, como lo expresa la figura N°27 para estos periodos. A modo de analizar en mayor detalle esta relación la tabla N°8 a continuación expresa la correlación entre ambas variables.

Tabla N° 9: Valores de Evapotranspiración diaria (ETd) y Temperatura máxima diaria durante eventos extremos de calor (Oc), con su coeficiente de r , r^2 y P valor del test de Fisher. Elaboración propia

Oc N°	Fecha (olas de calor)	días	Promedio Tmax (T°)	Promedio ETd (mm)	r	r²	P valor
1	15-17 - nov	3	31.2	6.4	0.76	0.58	9.56*10 ⁻⁵
2	19-21 - nov	3	33.4	6.9	0.76	0.59	
3	22-24 - dic	3	34.1	7.4	0.81	0.66	
4	28 dic / 1 ene	5	34.1	7.2	0.81	0.66	
5	12-14 - ene	3	33.6	6.9	0.82	0.67	
6	17-19 - ene	3	34	6.4	0.82	0.68	
7	30 ene / 1 feb	3	31.9	6.1	0.81	0.67	
8	8-10 feb	3	33.6	6.5	0.86	0.75	
9	15-17 - feb	3	32.6	6.1	0.87	0.76	
10	19-21 - feb	3	34.1	6.3	0.88	0.77	
11	27 feb / 1 mar	4	33.4	5.8	0.91	0.84	
12	4-6 mar	3	32.7	5.3	0.91	0.83	

De acuerdo con los resultados generados a partir de la correlación (r) y coeficiente de determinación (r^2) entre ETd y Tmax (Tabla N°8), en primer lugar, se obtuvo “ r ” positiva considerable para la mayoría de los periodos Oc (N°1-10), y “ r ” positiva muy fuerte para dos periodos (N°11 y 12). Segundo, el coeficiente de determinación “ r^2 ” presentó valores que incrementan paulatinamente, los datos no alcanzan valores tan significativos, por lo tanto, se induce que se explica una alta porción de variabilidad.

Con respecto al test de Fisher, este arrojó un p valor igual a $9.56 \cdot 10^{-5}$, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula de independencia y se comprueba un alto grado de asociación entre las variables microclimáticas de evapotranspiración diaria y temperatura máxima diaria.

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1.- DISCUSIÓN

4.1.2.- Dinámica de las superficies bajo efectos de pardeamiento

Como base para la discusión sobre el fenómeno de pardeamiento foliar, es preciso destacar que este estudio abarca solo una parte de la megasequía (como fenómeno de mayor folia perturbación para los ecosistemas). Sin embargo, este efecto representa el alcance de un umbral crítico de estrés hídrico para los bosques esclerófilos, el cual se manifestó de manera abrupta. Para lograr entender con mayor profundidad lo que este significará para el ecosistema se requiere de estudios de mayor amplitud temporal de observación y monitoreo, en este sentido se debe destacar el uso de imágenes satelitales para el monitoreo de ecosistemas, que, si bien no presenta la misma escala que el trabajo de campo, sirven para el análisis a escalas de paisaje.

Uno de los principales aportes que esta investigación logra compartir, es la importancia de distribución espacial del contenido de humedad, como un componente fundamental para la resistencia y resiliencia de los ecosistemas mediterráneos. En este sentido, se ha demostrado como los fondos de quebradas sirven de refugio contenedores de estas condiciones, pues como se ha demostrado, tanto coberturas densas como semidensas de fondos de quebradas han logrado resistir a los efectos de pardeamiento, siendo justamente estos lugares los que concentran la contención de altas condiciones de humedad y mejores ambientes en cuanto al verdor, o bien, contenido de clorofila.

Esto se pudo corroborar mediante el análisis de los índices espectrales NDWI y GNDVI. Estos demostraron presentar un alto nivel de correlación estadística, así como un alto nivel de coherencia estadística. Esta afirmación da cuenta de la estrecha relación entre productividad fotosintética y contenido de humedad.

Los sitios activos presentan niveles de contenidos de humedad más bajos con respecto a los sitios inactivos, independientemente de su cobertura, aunque de igual manera la cobertura favorece la capacidad de retención de humedad, siendo las coberturas densas las más húmedas. Esta condición, expone a la vez la dependencia de estos con el contenido de humedad, siendo las coberturas densas las más expuestas a los efectos de los eventos extremos de calor y los fenómenos de sequía como el pardeamiento. Como se demostró los lugares más húmedos son capaces de resistir. Sin fuentes cercanas de humedad, como lo son ríos, estero y fondos de quebradas esta condición negativa se agudiza.

Desde otro punto de vista microclimático, se ha demostrado que la componente de cobertura posee mayor relevancia en comparación con la exposición como contenedores de humedad. Este resultado se demostró mediante el análisis de ambos índices.

Pese a que varios sitios bajo efectos de pardeamiento se encuentran bajo niveles moderados de estrés hídrico para el periodo de estudio, aun así, fueron incapaces de resistir la desecación. Esto tal vez tenga que ver con un proceso que más prolongado, pero que sin embargo colapsa de manera abrupta debido a lo prolongado e intenso de este.

Los efectos producidos por estos periodos de disturbio son capaces de generar cambios en diversas escalas, sin embargo, la alteración hídrica resulta un factor muy sensible para los ecosistemas mediterráneos. Estos escenarios podrían generar fuertes efectos sobre de los microhábitats, generando efectos cada vez más severos en cuanto al contenido de humedad sobre los ecosistemas como el bosque esclerófilo.

4.1.2.- Dinámica microclimática de la evapotranspiración y las olas de calor

Fenómenos como el pardeamiento foliar son producto de la sensible variabilidad microclimática que presentan los ecosistemas mediterráneos como el bosque esclerófilo, sobre todo sus estrictas condiciones hídricas y de temperatura. En este sentido la evapotranspiración representa la distribución de las condiciones de humedad, las cuales varían con respecto al relieve y formación boscosa. Esto se ingirió mediante los valores presentes en los sitios de muestreo con pardeamiento activo (En su mayoría se encuentran sobre laderas), que presentaron los valores más bajos de Et, al contrario, los sitios inactivos (fondos de quebradas) presentaron valores mayores. Mas importancia a la cobertura por sobre la exposición.

Mediante las diferencias en la distribución microclimática de Et, se observa la relación con las coberturas boscosas, en donde los sitios densos por sobre los semidensos, presentaron los mayores valores de Et. No obstante, esto también es una debilidad ya que de acuerdo a lo señalado por Miranda (2018), son exactamente estas coberturas las más afectadas por el pardeamiento.

De acuerdo con lo observado para el índice NDWI, y la distribución espacial de la evapotranspiración, se observó un patrón similar en cuanto al comportamiento espacial y temporal de estas variables, por tanto, cabe destacar la fuerte correlación entre productividad fotosintética y la evapotranspiración como proceso ecológico.

En cuanto a lo observado con respecto a la relación entre la evapotranspiración y las olas de calor, se observó una dinámica temporal colineal entre ambas variables. Es decir, hubo una evolución constante en paralelo de las variables, siendo en los periodos de olas de calor cuando más evapotranspiración presentan el ecosistema. Esta similitud se corrobora mediante la alta correlación que presentaron ambas variables y un nivel estadísticamente significativo de asociación entre la Et y Tmax (Test de Fisher). Se induce por tanto que los eventos extremos de calor agudizan los procesos microclimáticos como evapotranspiración, alterando las funciones hídricas del ecosistema, generando situaciones de estrés ecológico como el pardeamiento foliar.

Con respecto a la metodología empleada para este estudio, se valora como apropiado el uso de técnicas de teledetección satelital y de estaciones meteorológicas como práctica de monitoreo de los ecosistemas mediterráneos para comprender el funcionamiento de la vegetación ante fenómenos cada vez más recurrentes como lo son los eventos extremos de calor. Además, se sugiere realizar este tipo de estudios a largo plazo para tener una mayor comprensión y observación de lo que ocurre ante estos eventos.

4.2.- CONCLUSIONES

Mediante la presente memoria, este estudio concluye que los fenómenos de estrés vegetal como el pardeamiento foliar y eventos extremos de calor comparten una estrecha relación con la distribución de la evapotranspiración como factor de resistencia y fisiológica. De la misma manera, se resalta la importancia de esta condición de contenido humedad para ecosistemas como el bosque esclerófilo. Fenómenos que alteren la dinámica microclimática, como los eventos extremos de calor (Oc) agudizan los procesos como la evapotranspiración. Esta relación converge sobre las funciones microclimáticas específicas del ecosistema. Generando condiciones de estrés, las cuales afectan la funcionalidad microclimática del esclerófilo, el cual presenta un alto grado de dependencia a partir de las funciones hídricas.

En términos generales se reportó una diferencia importante de las condiciones de humedad entre los sectores con pardeamiento activo e inactivo. En cuanto a estos se puede concluir que el estado de estrés vegetal depende en gran medida del estado de las condiciones de humedad. En este sentido, el relieve de fondos de quebradas demostró ser de gran importancia por su capacidad de contener las condiciones suficientes para la resistencia y resiliencia al pardeamiento. Al contrario, los sitios más alejados de estos sectores presentaron la mayor afectación producto de este fenómeno. Al respecto, mediante las pruebas estadísticas se logró corroborar estas relaciones.

Con respecto a los eventos extremos de calor, se puede concluir que estos agudizan las condiciones microclimáticas como la evapotranspiración. Estas pueden afectar de manera sistemática, como se observó mediante este colapso generalizado durante el periodo de estudio, debido a las fuertes presiones de estrés. Estos eventos actúan como catalizadores para la pérdida de la estructura y funcionalidad de los ecosistemas. En este sentido se logró demostrar la asociación entre estos dos fenómenos.

Ante el aumento de los eventos extremos de calor, su recurrencia, la decaída y abrupta pérdida de la productividad primaria, es bueno saber y reportar estos cambios ecosistémicos del bosque esclerófilo. A esto cabe destacar la importancia del análisis espacio temporal de la dinámica de los ecosistemas mediterráneos frente a fenómenos de estrés vegetal. Por esto se da una valoración positiva a la metodología empleada, mediante el uso de teledetección satelital y el uso de estaciones meteorológicas. Se sugiere emplear estos como método de monitoreo constante, sobre todo durante periodos críticos como las sequías.

El proceso de pérdida sincrónica no tiene comparación con otro sistema mediterráneo del mundo, se entiende este fenómeno como el alcance de un umbral de estrés hídrico y vegetal del ecosistema. Ante esta situación ¿Qué refleja este fenómeno? un colapso o bien, una forma adaptativa del ecosistema ante un periodo crítico. Es difícil determinarlo tan solo con la presente investigación, sin embargo, este forma parte de un proceso global, por tanto, cabe cuestionarnos ¿Hacia qué tipo de umbrales se dirigen los ecosistemas? ¿Cuánto podrían cambiar con respecto a su forma original?

BIBLIOGRAFÍA

- Alberdi, M. (1995). Ecofisiología de especies leñosas de los bosques higròfilos templados de Chile: Resistencia a la sequia y bajas temperaturas. 279–300.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H. (Ted., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684.
- Alvarado, C., Leandro, A., & Sarango, D. (2019). Comparison of Vegetation Indexes with Landsat images using cloud computing : Pampa de Majes-Siguas area , Arequipa-Peru (Period : Jun 1984 to Nov 2018) Introducción Métodos de Clasi cación y cuanti cación de los índices de vegetación Índices simples. 22(1), 27–34.
- Arancibia, J., Luis, J., Silva, A., & Zunino, D. (2020). Análisis vegetacional del bosque nativo en la región mediterránea de la zona central de Chile : zona de estudio valle de Colliguay * Vegetative analysis of native forest in the mediterranean region of central Chile : case study. *Investigaciones Geográficas*, 59, 105–119.
- Arias, P. A., & Poveda, G. (2007). Estimación de la relación adimensional de Budyko en Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 31(118), 69–78.
- Arroyo, M. T. K., Marquet, P., Marticorena, Clodomiro Simonetti, J., Cavieres, L., Squeo, F., Rozzi, R., & Massardo, F. (2006). El hotspot chileno, prioridad mundial para la conservación. *Diversidad de Chile: Patrimonios y Desafíos*, 90–95.
- Bambach, N., Meza, F. J., Gilabert, H., & Miranda, M. (2013). Impacts of climate change on the distribution of species and communities in the Chilean Mediterranean ecosystem. *Regional Environmental Change*, 13(6), 1245–1257.
- Becerra, P., Paula, S., & Miranda, A. (2020). El colapso del bosque esclerófilo y oportunidades para la restauración. Seminario Organizado Por Red Chilena de Seminario Organizado Por Red Chilena de Restauración Ecológica (RDRE).
- Bezerra, U. A., Oliveira, L. M. M. de, Candeias, A. L. B., Silva, B. B. da, Leite, A. C. L. de S., & Silva, L. T. M. de S. (2018). Comparativo do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) entre os Sensores OLI - Satélite Landsat-8 e MSI – Satélite Sentinel-2 em Região Semiárida. *Anuario Do Instituto de Geociencias*, 41(3), 167–177.
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic Contribution to the Southeast Pacific Precipitation Decline and Recent (2010-2015) Mega-Drought in Chile. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2015*.
- Cabrera, H. M. (2002). Respuestas ecofisiológicas de plantas en ecosistemas de zonas con clima mediterráneo y ambientes de altamontaña. *Revista Chilena de Historia Natural*, 75(3), 625–637.
- Chen, A., Orlov-Levin, V., & Meron, M. (2019). Applying high-resolution visible-channel aerial imaging of crop canopy to precision irrigation management. *Agricultural Water Management*, 216(November 2018), 196–205.

- Conaf. (2019). Informe situación del abastecimiento de agua en la reserva nacional río clarillo.
- CR2. (2015). Informe a la nación: La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. In Center for Climate and Resilience Research.
- de Jong, R., Verbesselt, J., Schaepman, M. E., & de Bruin, S. (2012). Trend changes in global greening and browning: Contribution of short-term trends to longer-term change. *Global Change Biology*, 18(2), 642–655.
- Di Castri, F., & Hajek, E. R. (1976). *Bioclimatología de Chile*.
- Diario Oficial, R. (2020). I Sección Leyes, reglamentos, decretos y resoluciones de orden general, Normas Generales CVE 1297693. www.diariooficial.cl
- Díaz, I., Sarmiento, C., Ulloa, L., & Moreira, E. (2002). Vertebrados terrestres de la Reserva Nacional Río Clarillo, Chile central: representatividad y conservación (pp. 433–448).
- Dirección Meteorológica de Chile. (2020). Informe Técnico - Olas de Calor en Chile: Una nueva metodología para el estudio y monitoreo de los eventos de altas temperaturas.
- Echeverría, C., Bolados, G., Rodríguez, J., Aguayo, M., & Premoli, A. (2014). Ecología de paisajes forestales. *Ecología Forestal. Bases Para El Manejo Forestal Sustentable y Conservación de Los Bosques Nativos de Chile*, May 2015, 583–604.
- Fisher, J. B., Lee, B., Purdy, A. J., Halverson, G. H., Dohlen, M. B., Cawse-Nicholson, K., Wang, A., Anderson, R. G., Aragon, B., Arain, M. A., Baldocchi, D. D., Baker, J. M., Barral, H., Bernacchi, C. J., Bernhofer, C., Biraud, S. C., Bohrer, G., Brunzell, N., Cappelaere, B., ... Hook, S. (2020). ECOSTRESS: NASA's Next Generation Mission to Measure Evapotranspiration From the International Space Station. *Water Resources Research*, 56(4).
- Freire, P. (2019). Estimación de la evapotranspiración de cultivos leñosos a partir de imágenes de satélites Sentinel-2 para la gestión del riego.
- Garfias Salinas, R., Castillo Soto, M., Ruiz Gozalvo, F., Vita Alonso, A., Bown Intveen, H., Navarro Cerrillo, R., & Bown Intveen Rafael Navarro Cerrillo, H. (2018). Remanentes del bosque esclerófilo en la zona mediterránea en Chile central: Caracterización y distribución de fragmentos (Vol. 43, Issue 9).
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Boisier, J. P., Galleguillos, M., Garreaud, R. D., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Lequesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation Extreme Precipitation along Subtropical Andes and its Relationship with Atmospheric Rivers in the Southeastern Pacific View project ANDEX.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289–298.
- Hajek, E., Molina, J., Fuentes, E., & Del Pozo, A. (1989). Zonación microclimática por efecto de los manchones de arbustos en el matorral de Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural*, 62(1), 85–94.
- Hulley, G., & Hook, S. (2017). ECOSTRESS, A NASA Earth-Ventures Instrument for studying links between the water cycle and plant health over the diurnal cycle. *Jet Propulsion Laboratory*, 2, 5494–5497.

- Lian, P., & Chunyu, Y. (2009). Study on mixed pixel classification method of remote sensing image based on fuzzy theory.
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2006). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. En *Revista de geografía Norte Grande*.
- Luna, A. L. (2011). Identificación, selección y aprovechamiento de árboles semilleros en áreas de conservación comunitaria en el municipio de Churumuco, Michocán, México.
- Marquet, P., Altamirano, A., K Arroyo, M. T., Fernández, M., Gelcich, S., Górski, K., Habit, E., Lara, A., Maass, A., Pauchard, A., Pliscoff, P., & Samaniego, H. C. (2019). Biodiversidad y cambio climático en Chile: evidencia científica para la toma de decisiones. 36.
- Miranda, A., Lara, A., Altamirano, A., Di Bella, C., González, M. E., & Julio Camarero, J. (2020). Forest browning trends in response to drought in a highly threatened mediterranean landscape of South America. *Ecological Indicators*, 115.
- Miranda, A., Lara, A., Altamirano, A., Zamorano-Elgueta, C., Jaime Hernández, H., González, M. E., Pauchard, A., & Promis, Á. (2018). Monitoring Chilean native forest area: A pending challenge. *Bosque*, 39(2), 265–275.
- Niemeyer, H. M., Bustamante, R. O., & Simonetti, J. a. (2002). Historia natural de la reserva nacional Río Clarillo: un espacio para aprender ecología.
- Olivera, L., Mattar, C., & Galleguillos, M. (2013). Estimation of actual evapotranspiration Mediterranean ecosystems of Chile by ASTER and MODIS data | Estimación de la evapotranspiración real en ecosistemas mediterráneos de Chile mediante datos ASTER y MODIS. *Revista de Teledeteccion*, 39, 46–56.
- Padrón, R. S., Gudmundsson, L., Decharme, B., Ducharne, A., Lawrence, D. M., Mao, J., Peano, D., Krinner, G., Kim, H., & Seneviratne, S. I. (2020). Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. *Nature Geoscience*, 13(7), 477–481.
- Pan, N., Feng, X., Fu, B., Wang, S., Ji, F., & Pan, S. (2018). Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening: Insights from time-varying trends. *Remote Sensing of Environment*, 214(May), 59–72.
- Pech May, F., Sánchez Hernández, J. V., & Sánchez Jacinto, H. (2021). Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2. *Lámpsakos*, 24, 48.
- Pertega, S., & Pita, S. (2004). Asociación de variables cualitativas: El test exacto de Fisher y el test de McNemar. 1, 1–7.
- Promis, A., Caldentey, J., & Ibarra, M. (2010). Microclima en el interior de un bosque de *Nothofagus pumilio* y el efecto de una corta de regeneración. *Bosque*, 31(2), 129–139.
- Quintanilla Pérez, V. G., Cadiñanos Aguirre, J. A., Latasa Zaballos, I., & Lozano Valencia, P. J. (2012). Aproximación biogeográfica a los bosques de la zona mediterránea de Chile: caracterización e inventario. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 91–114.
- Rodríguez, M. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, 38, 315–331.
- Sarricolea Espinoza, P. A., & Meseguer-Ruiz, O. (2016). Sequías en Chile central a partir de diferentes índices desde 1824. *Investigaciones Geográficas*, 50, 19.

- Schulz, J. J., Cayuela, L., Echeverria, C., Salas, J., & Rey Benayas, J. M. (2010). Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975-2008). *Applied Geography*, 30(3), 436–447.
- Segura, M. (2020). Correlación entre la humedad del suelo y los índices NDVI y NDWI cimi indicativo del estrés hídrico en el cultivo de caña de azúcar.
- Treinum, J., & Moya, D. (2018). Superficie remanten de bosque nativo 2018. In Geoneyen.
- Turcios, R. A. S. (2015). T-Student. Usos y abusos. *Revista Mexicana de Cardiología*, 26(1), 59–61.
- Valladares, F., Vilagrosa, A., Peñuelas, J., Ogaya, R., & Camarero, J. J. (2008). Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. *Ecología Del Bosque Mediterráneo En Un Mundo Cambiante*, 165–192.
- Villatoro, B. (2020). Uso de índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat 8 para monitoreo de humedad. 1, 225–243.

ANEXOS

Anexo N°1: Valores diarios de Temperatura máxima (Tmax), umbrales críticos Tmax y Olas de Calor. Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por Conaf y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

Noviembre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Umbral	28.2	29.0	29.9	29.4	29.2	30.2	30.1	29.8	29.2	30.4	30.3	29.5	30.6	30.7	30	31.3	30.3	30.1	32.2	31.5	30.1	31	29.7	29.7	29.6	30.1	29.7	29.7	30.2	29.8	
Máximas diarias	25.9	19.8	28.7	26.8	20.3	28.5	30.4	33.9	27.1	33.1	33.4	27.6	30.5	29.7	30.6	32	31.1	29.8	33.1	33.4	33.9	29.5	30.3	25.3	23.2	17.2	24.7	30.4	30.5	28.5	
Olas de Calor																N°1				N°2											
Diciembre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
	31.3	30.6	31.7	30.3	30.7	30.2	31.1	32.2	32	31.4	31.6	32	30.2	31.2	31.3	31.7	31.8	31.1	31.5	31.0	31.2	32.1	32.4	32.8	33.4	32.4	32.4	32.6	32.8	33.4	31.7
	32.4	30.8	29.3	29.4	29.2	32.3	30.5	28.3	30.6	30.3	30.7	29.3	33.2	31	21.2	28.6	29.7	32.5	31.8	26.4	30.6	32.1	34.2	36	31.5	30	32.1	33.3	34.1	34.8	34.2
																							N°3							N°4	
Enero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
	32.0	32.4	33.2	33.9	32.6	31.9	31.2	31.3	33.2	31.7	33	33.4	32.1	32.8	32.2	32.7	33.3	32.1	33.1	31.8	32.5	32.3	31.9	32.4	32.8	33.2	33.6	33.7	33.8	31.8	32.6
	34.2	31.6	32.1	31.3	31.6	20.4	26.8	29.9	23.7	29.7	32.7	33.7	33.9	33.2	32.1	32.7	33.9	33.5	34.7	29.7	33	33	31	30.9	32.1	33.2	33.9	33.7	33.1	29.7	32.6
												N°5					N°6														N°7
Febrero	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
	33.4	32.8	33.3	32.1	32.4	32	31.6	32.7	33.6	33.2	32.9	32.1	32.6	32.8	32.3	31.5	31.6	31.1	32.2	31.6	31.4	31.3	32	31.5	31.8	32.5	32.7	32.6	32.7		
	33.4	32.1	33.2	31.5	28.8	27.4	29.4	33	34.3	33.5	32.9	32.1	29.8	29.7	33.1	33	31.7	28.7	35.6	34.7	34.1	29.1	29.2	29	26.5	30.7	34.2	32.6	33.5		
									N°8							N°9				N°10								N°11			
Marzo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
	31.8	31.8	32.8	31.7	31.8	33.2	31.3	31.6	31.9	32.8	32.6	31.5	31.2	30.8	32.6	31.4	31.3	30.2	30.7	30.5	30.3	30.5	30.7	30.3	29.9	30	31	30.4	29.8	29.8	30.2
	33	30.6	31.9	32.5	32.1	33.7	31.1	31.5	31.8	32.8	32.3	32.5	30.4	28.9	30.4	31.5	27.8	28.2	29.2	29.4	29.2	21.4	26.3	30.8	29.3	27.7	27.7	23.5	24.1	29	30.7
					N°12																										