

ANÁLISIS TEMPORAL DE LA TEMPERATURA DE NIVEL DE SUELO EN LA PROVINCIA DE OSORNO MEDIANTE EL USO DE TELEDETECCIÓN

TEMPORAL ANALYSIS OF GROUND LEVEL TEMPERATURE IN THE PROVINCE OF OSORNO USING REMOTE SENSING

Carolina Gamboa², Samuel Antonio Opazo¹, Guillermo Roberto Rantul¹, María Inés Díaz²

ABSTRACT

Soil temperature is a critical indicator for ecological and biogeochemical processes, including organic matter decomposition, nutrient availability and microbial activity. These factors are key to biodiversity, agricultural productivity and natural resource management, and monitoring them using remote sensing helps to understand long-term environmental and climatic dynamics. The province of Osorno, which encompasses varied ecosystems such as native forests, grasslands and wetlands, has experienced significant changes in temperature and precipitation patterns as a result of global climate change and human activities such as deforestation and urban expansion. These interventions have increased soil exposure to solar radiation, reducing its thermal retention capacity and exacerbating temperature variability in the area. Thus, this work seeks to collect thermal data by using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), the Vegetation Percentage Index (PV), the Emissivity Index (ϵ), and the Upper Atmospheric Level Radiance Index (TOA), necessary to subsequently calculate the Brightness Temperature (BT) in the January-March period, covering a 10-year period (2014-2024). Soil surface temperature (LST) was calculated using various indices, such as, which were derived from spectral bands 4 and 5. In parallel, the results show an increase in land surface temperatures that, although slow, has been progressive. Between 2014 and 2024, there is an overall average increase of 2.98 °C, with intermediate variations. When analyzing the results by land cover type, the highest surface temperatures are observed in areas without vegetation (65.85 °C) and in urban zones (62.59 °C), while densely vegetated areas register lower temperatures. For example forests show as maximum temperature 56.99°C, wetlands present a maximum of 61.66 °C, underlining the role of these together with vegetation in thermal regulation and climate change mitigation. This work offers an integral vision of the environmental dynamics in Osorno, providing essential data for climate adaptation and the formulation of environmental conservation and sustainable management policies to mitigate the effects of climate change and preserve the ecological balance.

Keywords: Remote sensing, Soil surface temperature, Landsat 8, Osorno Province, Climate change, Land use, Deforestation, Urbanization.

RESUMEN

La temperatura del suelo es un indicador crítico para los procesos ecológicos y biogeoquímicos, incluyendo la descomposición de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana. Estos factores son clave para la biodiversidad, la productividad agrícola y la gestión de recursos naturales, y su monitoreo mediante el uso de la teledetección ayuda a comprender las dinámicas ambientales y climáticas a largo plazo. La provincia de Osorno, que abarca variados ecosistemas, como bosques nativos, praderas y humedales, ha experimentado cambios significativos en los patrones de temperatura y precipitación, resultado del cambio climático global y de actividades humanas como la deforestación y la expansión urbana. Estas intervenciones han incrementado la exposición del suelo a la radiación solar, reduciendo su capacidad de retención térmica y exacerbando la variabilidad de temperatura en la zona. Así, este trabajo busca recopilar datos térmicos mediante el empleo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Porcentaje de Vegetación (PV), el Índice de Emisividad (ϵ), y el Índice de Radiancia de Nivel Superior de la Atmósfera (TOA), necesario para calcular posteriormente la Temperatura de Brillo (BT) en el periodo enero-marzo, abarcando un periodo de 10 años (2014-2024). La temperatura superficial del suelo (LST) fue calculada empleando diversos índices, los cuales se derivaron a partir de las bandas espectrales 4 y 5. Paralelamente, los resultados muestran un aumento que, si bien es lento, ha sido progresivo en las temperaturas superficiales del suelo. Entre los años 2014 y 2024, existe un aumento promedio general de 2,98 °C, con variaciones intermedias. Si observamos los resultados por tipo de cobertura de suelo, las mayores temperaturas superficiales se presentan en áreas desprovistas de vegetación, con 65,85 °C, y en zonas urbanas, con 62,59 °C, mientras que las zonas con vegetación densa registran temperaturas más bajas, por ejemplo los bosques muestran como temperatura máxima 56,99°C, los humedales presentan una máxima de 61,66 °C, subrayando el papel de estos junto a la vegetación en la regulación térmica y en la mitigación del cambio climático. Este trabajo ofrece una visión integral de las dinámicas ambientales en Osorno, aportando datos esenciales para la adaptación climática, la formulación de políticas ambientales de conservación y manejo sostenible para mitigar efectos del cambio climático y preservar el equilibrio ecológico.

Palabras clave: Teledetección, Temperatura superficial del suelo, Landsat 8, Provincia de Osorno, Cambio climático, Uso del suelo, Deforestación, Urbanización.

¹ Escuela Ciencias de la tierra, Facultad de Ingeniería Ciencia y Tecnología, Universidad Bernardo O'Higgins.

² Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Bernardo O'Higgins.

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la temperatura del suelo es crucial para entender las dinámicas ambientales y climáticas a largo plazo. La temperatura del suelo influye directamente en diversos procesos ecológicos y biogeoquímicos, incluyendo la descomposición de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana. Además, las variaciones en la temperatura del suelo pueden afectar la biodiversidad y la distribución de especies, así como la productividad agrícola y la gestión de los recursos naturales (Brady & Weil, 2008).

Este estudio se enfoca en analizar la variación temporal de la temperatura del suelo en la provincia de Osorno, ubicada en la región de Los Lagos, Chile, durante el periodo comprendido entre los años 2014 y 2024. La provincia de Osorno es representativa de una amplia variedad de ecosistemas, incluyendo bosques nativos, praderas y humedales, se extiende desde la costa del océano Pacífico hasta la cordillera de los Andes, en el límite con Argentina. Estas variaciones pueden ser influenciadas tanto por fenómenos climáticos globales, como el cambio climático, así como por actividades humanas que alteran la cobertura del suelo, ejemplos, la deforestación, la urbanización, el cambio de tipo de uso de suelo, etc.

La provincia de Osorno, ubicada en la región de Los Lagos, Chile, se caracteriza por una rica biodiversidad, albergando una gran cantidad de especies de flora y fauna que dependen de las condiciones climáticas y ambientales. En las últimas décadas, la región ha experimentado significativas variaciones en los patrones de temperatura y precipitación. Estos cambios, tanto de origen global como resultado del cambio climático, han desencadenado una serie de transformaciones en los ecosistemas naturales de la provincia de Osorno. Uno de los efectos más notables de estas variaciones es la alteración de la temperatura del suelo. Las temperaturas más cálidas en verano y las más frías en invierno han influido en los ciclos de nutrientes y en los procesos ecológicos de la región, afectando la biodiversidad y el equilibrio de los ecosistemas locales.

Además de los fenómenos climáticos, las actividades humanas han contribuido a la variabilidad de la temperatura del suelo. La

deforestación indiscriminada, su reemplazo por monocultivos orientados a la industria forestal y la expansión urbana han modificado la cobertura del suelo, aumentando la exposición a la radiación solar y afectando la capacidad de retención de calor. Estos factores antropogénicos han exacerbado aún más los cambios en la temperatura del suelo.

Utilizando imágenes satelitales Landsat 8, mediante teledetección, este estudio pretende analizar las variaciones durante los meses de verano de la temperatura del suelo en la provincia de Osorno, identificando patrones temporales y evaluando su relación con el uso de los suelos. El Landsat 8, lanzado el 11 de febrero de 2013, está equipado con dos instrumentos principales: el *Operational Land Imager* (OLI) y el *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). El OLI captura datos en bandas espectrales visibles, infrarrojas cercanas y de onda corta, mientras que el TIRS se enfoca en las bandas térmicas. Estas bandas térmicas son esenciales para el cálculo de la temperatura de la superficie terrestre (LST, por sus siglas en inglés). (Roy et al., 2014).

El proceso de cálculo de la temperatura superficial del suelo a partir de imágenes Landsat 8 implica varios pasos:

- Corrección Radiométrica y Conversión a Radiancia de Nivel Superior de la Atmósfera (TOA): Este paso convierte las lecturas de los sensores en valores de reflectancia de la superficie. La corrección radiométrica ajusta los datos crudos del sensor para eliminar los efectos atmosféricos y mejorar la precisión de las mediciones.
- Cálculo de la Temperatura de Brillo (BT): La radiancia TOA medida por el TIRS se convierte a temperatura de brillo utilizando la ecuación inversa del Planck. Esta conversión es esencial para obtener una estimación inicial de la temperatura de la superficie terrestre.
- Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): El NDVI se utiliza para distinguir áreas de vegetación de áreas de suelo desnudo. Se calcula utilizando la banda roja (B4) y la banda de infrarrojo cercano (B5). Este índice ayuda

a identificar la cobertura vegetal y facilita el análisis de la temperatura del suelo en función del tipo de cobertura.

- Cálculo del Porcentaje de Vegetación (PV): El PV se calcula utilizando el NDVI y representa la proporción de área cubierta por vegetación en una región específica. Este valor es importante para minimizar los efectos de las variaciones de iluminación en la medición de la temperatura del suelo.
- Cálculo de la Emisividad Superficial: La emisividad es una medida de la eficiencia con la cual una superficie emite radiación térmica. Se estima a partir del NDVI, donde las superficies con vegetación densa tienen emisividades más altas en comparación con las áreas de suelo desnudo. La emisividad se ajusta para mejorar la precisión del cálculo de la temperatura de la superficie terrestre
- Ajuste de la Temperatura de Brillo a LST: La temperatura de brillo obtenida se ajusta por la emisividad de la superficie para calcular la temperatura de la superficie terrestre real (LST). Este ajuste asegura que la temperatura calculada refleje con precisión las condiciones reales de la superficie.

Diversos estudios han demostrado la eficacia de Landsat 8 para el monitoreo de la temperatura del suelo. Su alta resolución espacial (30 metros para bandas visibles e infrarrojas, y 100 metros para bandas térmicas) permite un análisis detallado de la variabilidad espacial de la LST, lo cual es esencial para estudios de cambio climático, gestión de recursos naturales y planificación urbana (GIS & Beers, 2019).

El enfoque principal del estudio es proporcionar información crítica sobre las tendencias de la temperatura del suelo en la provincia de Osorno, lo cual es esencial para comprender el impacto de los cambios climáticos y medioambientales en la región. Además, los resultados obtenidos pueden contribuir a la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos naturales y el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático.

La importancia de este estudio radica en su capacidad para ofrecer una visión integral de las

dinámicas climáticas y medioambientales en la provincia de Osorno, a través de un análisis temporal que abarca una década completa. Esto no solo permite identificar tendencias a largo plazo, sino también evaluar el impacto de eventos climáticos extremos y cambios en el uso del suelo sobre su temperatura.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Principal

Analizar la variación temporal de la temperatura del suelo en la provincia de Osorno, Chile, durante el periodo comprendido entre 2014 y 2024, y su relación con el uso del suelo, considerando tanto fenómenos climáticos como actividades humanas.

2.2. Objetivos Específicos:

Los objetivos específicos de este estudio son:

- Calcular el NDVI para distinguir áreas de vegetación y suelo desnudo.
- Calcular el PVI para minimizar los efectos de las variaciones de iluminación.
- Extraer y analizar la temperatura superficial del suelo.
- Evaluar las variaciones temporales de la temperatura del suelo y su relación con los diferentes tipos de uso de suelo existente en la provincia.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Teledetección

Se define como la técnica que permite obtener una imagen de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales a través de la interacción energética entre el sensor y el objeto, ya sea mediante la reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o mediante la emisión propia del objeto observado (Salinero, 2008).

Su importancia radica en la posibilidad de obtener información sobre grandes áreas de difícil acceso por condiciones políticas o geográficas, lo que se traduce en una reducción de costos asociados a la recolección directa de datos. Además, la teledetección permite recopilar datos de forma regular, lo que permite detectar y monitorear cambios con una resolución espacial final (Berdugo

Muñoz & G. J., 2016).

Esta información va más allá del ojo humano y se obtiene a través de la interacción de elementos clave como el sensor, el objeto de estudio y el flujo de energía, este último también conocido como el espectro electromagnético (Veneros et al., 2020).

Radiación electromagnética, según la Teoría del Electromagnetismo desarrollada por James Clerk Maxwell en el siglo XIX, la radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que viaja a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. Está formado por longitudes de onda y frecuencias, puede manifestarse de diversas formas como radiación térmica, luz visible, rayos X o rayos gamma. La radiación electromagnética puede propagarse en el vacío.

El espectro Electromagnético es el conjunto de todos los tipos de radiación electromagnética, organizados según su longitud de onda y frecuencia. Cada tipo de radiación se caracteriza por una longitud de onda y una frecuencia específicas. El espectro abarca desde las

radiaciones de longitudes de onda más cortas, como los rayos gamma y los rayos X, hasta las más largas, como las ondas de radio. Dentro de este rango también se encuentran la luz ultravioleta, la luz visible y la luz infrarroja. La clasificación de las bandas dentro del espectro puede variar dependiendo del enfoque, como el diseño de las herramientas de captura o las propiedades físicas de las longitudes de onda. Cada tipo de radiación tiene una frecuencia y longitud de onda que la caracteriza, para las ondas cortas se miden en micrómetros (μm), mientras para las más largas se miden en centímetros o metros (Zwinkels, 2015). Desde el punto de la teledetección conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentes empleadas.

Espectro Visible (0.4-0.7 μm), tiene el nombre de visible porque es la única banda electromagnética que puede percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de la región suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (A: 0.4-0.5 μm), verde (V: 0.5-0.6 μm), y rojo (R: 0.6-0.7 μm), en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda como se aprecia en la Figura 1.

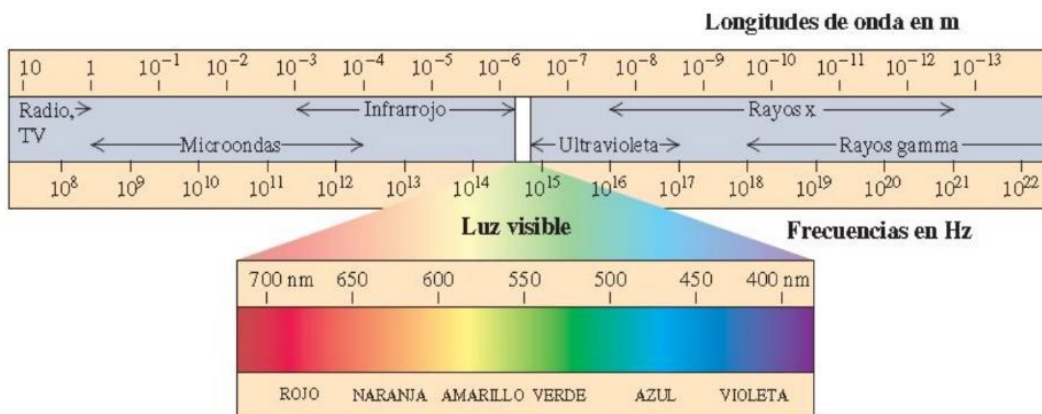


Figura 1. Teledetección Ambiental. Fuente: (Salinero, 2008)

El infrarrojo cercano (IRC: 0.7- 1.3 μm) se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, resulta de gran importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

En el infrarrojo medio (IRM: 1.3 a 8 μm) se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. El infrarrojo de onda corta SWIR se sitúa entre 1.3 a

2.5 μm resulta una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos.

Otra banda de interés está comprendida entre 3 y 5 μm y suele denominarse más propiamente como el infrarrojo medio (IRM) siendo este determinante para la detección de focos de alta temperatura como incendios o volcanes activos entre otros.

El Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8 a 14 μm) corresponde al segmento del espectro donde se registra la mayor emisión térmica terrestre. Esta banda permite detectar el calor emitido por la mayoría de las coberturas de la superficie terrestre. La absorción reduce la radiación a medida que las moléculas gaseosas en la atmósfera, como el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el oxígeno (O_2) y el ozono (O_3), atrapan los rayos de luz. Este fenómeno de absorción es altamente selectivo y está limitado a longitudes de onda específicas dentro del espectro electromagnético. Las regiones del espectro donde estos procesos no son importantes se denominan "ventanas atmosféricas" porque permiten el paso de casi toda la energía (Vanegas, 2015).

Curvas espectrales. Los diferentes tipos de cobertura terrestre (bosque, suelo, cultivos, agua, nieve, etc.) se distinguen por la cantidad de energía que reflejan en una determinada región del espectro. La interacción de la radiación

electromagnética con los objetos depende de sus características morfológicas, composición fisicoquímica y configuración superficial. Los espectros específicos del tipo de cobertura observada forman su firma espectral, esta colección de firmas espectrales se conoce como la curva espectral.

La relación de la reflectividad con las superficies de la tierra, si la superficie es lisa, se incrementan los efectos especulares, por lo que la reflectividad puede cambiar fuertemente en función de la posición relativa del sol, del sensor y la textura superficial de la tierra (Veneros et al., 2020).

El software que se utilizó para todos los geoprocesos y análisis espaciales fue ArcGIS Pro.

Se utilizaron Imágenes Landsat8 y las bandas 4 y 5 para el cálculo del NDVI y la banda 10 para el resto de los geoprocesos.(Tabla 1)

Tabla 1: Bandas utilizadas de las imágenes Landsat 8. *Elaboración propia.*

| LANDSAT 8 | | | |
|------------------------|------------------|---------------------|--------------------|
| | Longitud de onda | Randience Mult Band | Randience Add Band |
| Banda 4- Roja | 0.64 - 0.67 | 1.0170E-02 | -50.84913 |
| Banda 5- NIR | 0.85 - 0.88 | 6.2234E-03 | -31.11713 |
| Banda 10- TIRS1 | 10.60 - 11.19 | 3.3420E-04 | 0.10000 |

3.2. Selección de la Zona de Estudio

La provincia de Osorno, fue seleccionada como área de estudio debido a su relevancia ambiental, así como a las variaciones en dos variables clave: las precipitaciones y las temperaturas ambiente durante la última década. Según la Dirección Meteorológica de Chile (DMC,2021), Osorno ha experimentado cambios significativos en sus patrones climáticos, como fluctuaciones en las precipitaciones anuales y aumentos graduales en las temperaturas promedio (Figura 2).

Estas características, sumadas a la diversidad de usos del suelo en la región, que incluye actividades agrícolas, ganaderas y forestales, hacen de la provincia de Osorno un área representativa para estudiar la interacción entre el cambio climático, el manejo de los recursos naturales y las actividades humanas.

METODOLOGÍA

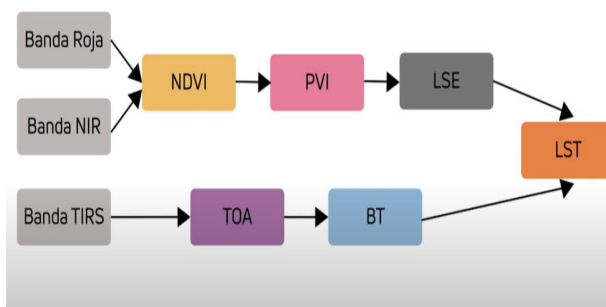


Figura 2: Diagrama de flujo metodología utilizada para la obtención de la temperatura superficial de suelo.

En comparación con otras provincias, Osorno ofrece una combinación única de sensibilidad

climática y relevancia ecológica, posicionándola como un caso de estudio clave para evaluar los efectos del cambio climático en zonas del sur de Chile (Urrutia & Vuille, 2009).

A continuación, se presenta un análisis de las precipitaciones y las temperaturas registradas en la estación meteorológica de Osorno. En la Tabla 1, se presenta un resumen de las precipitaciones anuales registradas en la estación meteorológica de Osorno (Tabla 2):

Tabla 2. Precipitaciones anuales (mm). *Elaboración propia a partir de datos de la Dirección Meteorológica de Chile (MeteoChile) y del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)².*

| Año | Precipitación Anual (mm) |
|------|--------------------------|
| 2014 | 1359 |
| 2015 | 1185 |
| 2016 | 831 |
| 2017 | 1358 |
| 2018 | 1316 |
| 2019 | 865 |
| 2020 | 1137 |
| 2021 | 744 |
| 2022 | 1103 |
| 2023 | 1210 |

Estos datos indican una tendencia general de disminución en las precipitaciones anuales durante este período. (Dirección Meteorológica de Chile [DMC], 2021; Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR]², 2023).

También se consideró la tendencia de la temperatura ambiente, en la provincia de Osorno, las cuales han mostrado variaciones en la última década. A continuación, se presenta un resumen de las temperaturas medias anuales y las temperaturas máximas y mínimas promedio para cada año (Tabla 3).

Estos valores son aproximados y se basan en datos históricos disponibles para la región. Se observa una ligera tendencia al aumento en la temperatura media anual durante este período. (Dirección Meteorológica de Chile [DMC], 2021; Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR]², 2023).

Tabla 3. Temperaturas ambiente anuales. *Elaboración propia a partir de datos de la Dirección Meteorológica de Chile (MeteoChile) y del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)².*

| Año | Temp. Media (°C) | Temp. Máx. Promedio (°C) | Temp. Min, Promedio (°C) |
|------|------------------|--------------------------|--------------------------|
| 2014 | 12.5 | 17.8 | 7.2 |
| 2015 | 12.7 | 18.0 | 7.4 |
| 2016 | 12.9 | 18.2 | 7.6 |
| 2017 | 12.8 | 18.1 | 7.5 |
| 2018 | 12.6 | 17.9 | 7.3 |
| 2019 | 12.7 | 18.0 | 7.4 |
| 2020 | 12.8 | 18.1 | 7.5 |
| 2021 | 12.9 | 18.2 | 7.6 |
| 2022 | 12.7 | 18.0 | 7.4 |
| 2023 | 12.8 | 18.1 | 7.5 |

La recopilación de información geográfica: Se obtuvieron datos sobre las características del suelo y la topografía de la zona de estudio, del universo de usos de suelo disponible (Figura 3) (Centro de Información de Recursos Naturales, 2012; Ilustre Municipalidad de Osorno, 2019), se seleccionaron para el presente análisis los siguientes:

- Áreas desprovistas de Vegetación.
- Áreas urbanas e industriales.
- Bosques.
- Cuerpos de agua.
- Humedales.

- Nieves eternas y glaciares.
- Praderas y matorrales.
- Terrenos agrícolas.

3.3. Adquisición de Imágenes Landsat 8

Las imágenes satelitales, como las fotografías digitales, consisten en una matriz digital de puntos (píxeles) capturados por sensores montados en satélites que orbitan alrededor de la tierra. A medida que el satélite se mueve en órbita, barre la superficie terrestre con una serie de detectores que registran los reflejos de la energía electromagnética, la radiación, la temperatura o las variables de altitud topográficas o geofísicas. Asociado con cada píxel hay un número llamado Nivel digital (ND), que representa la intensidad o el brillo promedio del área relativa más pequeña de la escena. Generalmente, el rango de niveles digitales es de 0 a 255. Estas imágenes muestran el número de bandas, la porción del espectro electromagnético registrada por cada banda, el tamaño de la escena, su resolución espacial (nivel de detalle) y su resolución temporal. (Vanegas, 2015)

Las imágenes satelitales Landsat 8 utilizadas en este estudio fueron obtenidas a través de la plataforma del USGS Earth Explorer. Para asegurar la calidad y relevancia de los datos, se aplicaron criterios específicos de selección:

- Cobertura de Nubes: Se seleccionaron imágenes con una cobertura de nubes inferior al 20%, garantizando así que las observaciones no fueran obstruidas por fenómenos atmosféricos que pudieran afectar la precisión del análisis.
- Estacionalidad: Se eligieron imágenes correspondientes a los meses de enero, febrero y marzo para cada año del periodo de estudio (2014-2024). Estos meses fueron seleccionados debido a su representación del verano austral, cuando las temperaturas del suelo son más pronunciadas y las condiciones atmosféricas tienden a ser más estables.
- Resolución Temporal: Las imágenes de Landsat 8 están disponibles aproximadamente cada 15 días. Debido a esta frecuencia, en algunos años se seleccionaron imágenes de enero, mientras que en otros años se eligieron imágenes de febrero o marzo, según la

disponibilidad y la calidad de las imágenes sin obstrucción por nubes, para el análisis se seleccionaron imágenes entre los años 2010 al 2024.

- Pre procesamiento de Imágenes
- Corrección geométrica: Las imágenes se alinearon a un sistema de coordenadas geográficas estandarizado (WGS84).

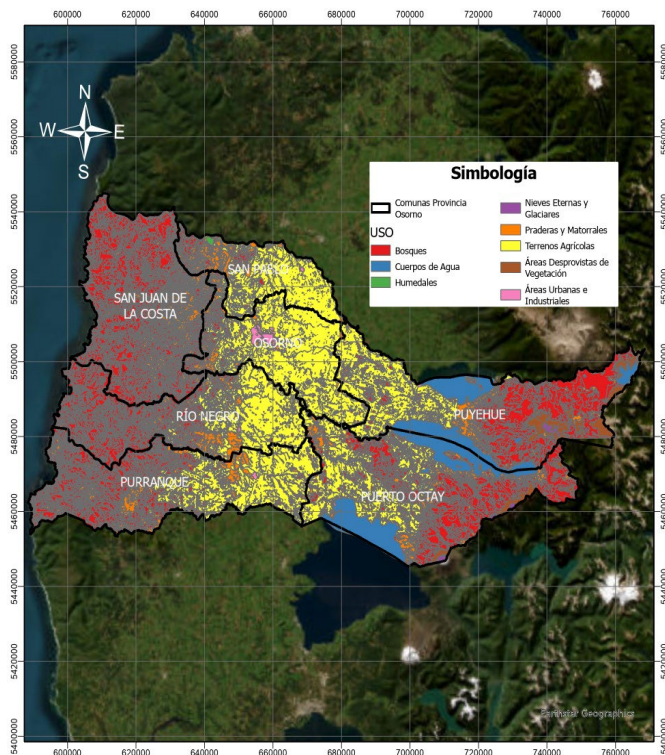


Figura 3. Tipos de uso de suelo en la Provincia de Osorno. Rojo: bosques; azul: cuerpos de agua; verde: humedales; morado: nieves eternas y glaciares; naranja: praderas y matorrales; amarillo: agrícolas; café: sin vegetación; rosado: urbano-industrial. Fuente: elaboración propia.

3.4. Fórmulas para estimar temperatura superficial del suelo

- 1) Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

$$NDVI = (B5 - B4) / (B5 + B4)$$

Donde B5 es la banda del infrarrojo cercano (NIR) y B4 es la banda roja (Red) de Landsat 8.

Aplicación: Se calculó el NDVI para cada imagen preprocesada para distinguir áreas de vegetación de áreas de suelo desnudo.

Extracción de la Temperatura Superficial del Suelo

Bandas utilizadas: Se utilizó la banda térmica B10, la banda roja B4 y la banda del infrarrojo cercano B5 de Landsat 8.

2) Cálculo de TOA (*Top of Atmosphere*):

$$TOA = ML \times Q_{cal} + AL$$

Donde: ML es el factor de reescalamiento multiplicativo específico de la banda; Q_{cal} corresponde a la banda 10 y AL es el factor de reescalamiento aditivo específico de la banda.

3) Conversión de TOA a *Brightness Temperature* (BT):

$$BT = K_2 \cdot (\ln(K_1 \cdot TOA) + 1) - 273.15$$

Donde: K1 y K2 son constantes de calibración térmica específicas del sensor.

4) Calcular la proporción de vegetación (Pv):

$$Pv = ((NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}))^2$$

5) Cálculo de la emisividad (ϵ):

$$\epsilon = 0.004 \times Pv + 0.986$$

6) Cálculo de la temperatura de la superficie terrestre (LST):

$$LST = BT + (0.00115 \times BT / 1.4388) \times (\ln(\epsilon))$$

4. RESULTADOS

4.1. Mapas de NDVI y Temperatura Superficial:

Se generaron mapas del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) utilizando las bandas 4 y 5 de las imágenes Landsat 8. Estos mapas permitieron distinguir las áreas de vegetación y suelo desnudo en la provincia de Osorno para el período de estudio (2014-2024)

Además, se obtuvieron mapas de la temperatura superficial del suelo calculados a partir de la banda

térmica B10 y las bandas B4 y B5. Estos mapas muestran la variación de la temperatura del suelo a lo largo del tiempo y fueron generados entre los meses de enero, febrero y marzo de cada año seleccionado. (Ver Figura 4 y 5).

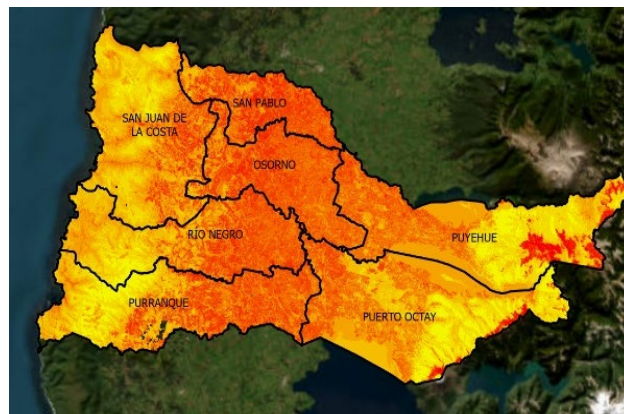


Figura 4. Mapa de temperatura del suelo en la provincia de Osorno. Los límites comunales se indican con líneas negras. El gradiente de color, de naranja a amarillo, representa de mayor a menor temperatura. *Elaboración propia*

| Value | |
|-------|-----------------|
| | 44.278 - 52.599 |
| | 52.6 - 53.755 |
| | 53.756 - 54.795 |
| | 54.796 - 56.066 |
| | 56.067 - 57.453 |
| | 57.454 - 58.84 |
| | 58.841 - 60.112 |
| | 60.113 - 61.845 |
| | 61.846 - 65.082 |
| | 65.083 - 73.75 |

Figura 5. Cuadro de simbología de las temperaturas de suelo mostradas en los mapas de temperatura. *Elaboración propia.*

4.2. Tablas de Temperaturas Superficiales:

Se crearon tablas detalladas que contienen los valores de la temperatura superficial del suelo para cada imagen procesada. Estas tablas incluyen las conversiones de TOA a *Brightness Temperature* (BT) y el cálculo de la temperatura de la superficie terrestre (LST)(Tabla 4).

Tabla 4. Temperaturas por cada año en valores Kelvin. *Elaboración propia.*

| TEMPERATURA LST GRADOS KELVIN | | |
|-------------------------------|---------|---------|
| Año | Min | Max |
| 2014.000 | 313.114 | 345.368 |
| 2015.000 | 317.719 | 342.500 |
| 2016.000 | 320.031 | 342.855 |
| 2017.000 | 317.379 | 336.428 |
| 2018.000 | 313.752 | 332.978 |
| 2019.000 | 317.218 | 346.088 |
| 2020.000 | 318.924 | 347.693 |
| 2021.000 | 314.872 | 337.141 |
| 2022.000 | 318.551 | 340.271 |
| 2023.000 | 316.395 | 348.686 |
| 2024.000 | 318.642 | 348.349 |

4.3. Análisis de Valores Extremos:

Se realizó un análisis preliminar de los valores extremos de temperatura superficial para cada año del período de estudio. Este análisis ayudó a identificar posibles errores o valores anómalos que pudieran distorsionar los resultados (Figura 6).

Variación de las temperaturas superficiales periodo 2014 - 2024

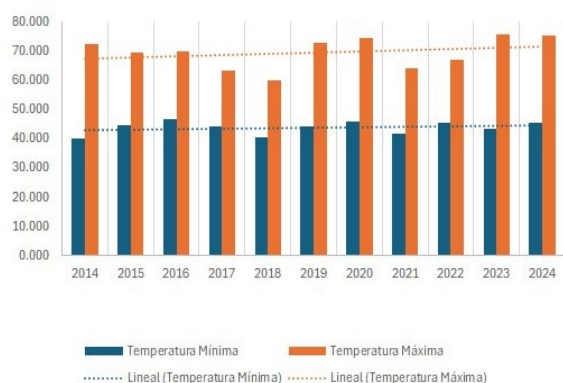


Figura 6. Gráfico de temperaturas extremas por año analizado. *Elaboración propia.*

4.4. Filtrado y Depuración de Datos:

Se depuraron los valores erróneos o fuera de rango, utilizando el año 2019 como referencia debido a la alta calidad de las imágenes de ese año. Se eliminaron los píxeles que mostraban valores extremos fuera de los rangos definidos como válidos para el estudio.

4.5. Valores Definitivos:

Finalmente, se obtuvieron los valores definitivos de temperatura superficial para cada uno de los años del período de estudio, ajustando y corrigiendo los datos (Tabla 5 y Figura 7).

Tabla 5. Valores finales de temperatura superficial de suelo. *Elaboración propia.*

| TEMPERATURA LST GRADOS CELSIUS | | |
|--------------------------------|--------|--------|
| Año | Min | Max |
| 2014 | 39.964 | 72.218 |
| 2015 | 44.569 | 69.350 |
| 2016 | 46.881 | 69.705 |
| 2017 | 44.229 | 63.278 |
| 2018 | 40.602 | 59.828 |
| 2019 | 44.068 | 72.938 |
| 2020 | 45.774 | 74.543 |
| 2021 | 41.722 | 63.991 |
| 2022 | 45.401 | 67.121 |
| 2023 | 43.245 | 75.536 |
| 2024 | 45.492 | 75.199 |

Variación de las temperaturas superficiales periodo 2014 - 2024

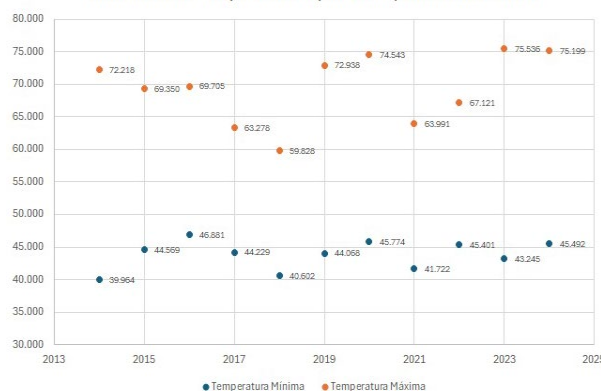


Figura 7. Variación de temperaturas superficiales a través del tiempo. *Elaboración propia.*

4.6. Análisis por tipo de uso de suelo seleccionado:

Se generaron mapas de temperatura por cada uno de los tipos de suelo seleccionados, georreferenciando en sistema de referencia SIRGAS un punto de control por cada tipo de cobertura, con ello poder identificar la temperatura en el mismo punto geográfico cada año (Figura 8 a 15).

Análisis temporal de la temperatura de nivel de suelo en la provincia de Osorno mediante el uso de teledetección

Opazo Samuel Antonio, Rantul Guillermo Roberto, Carolina Gamboa, María Inés Díaz

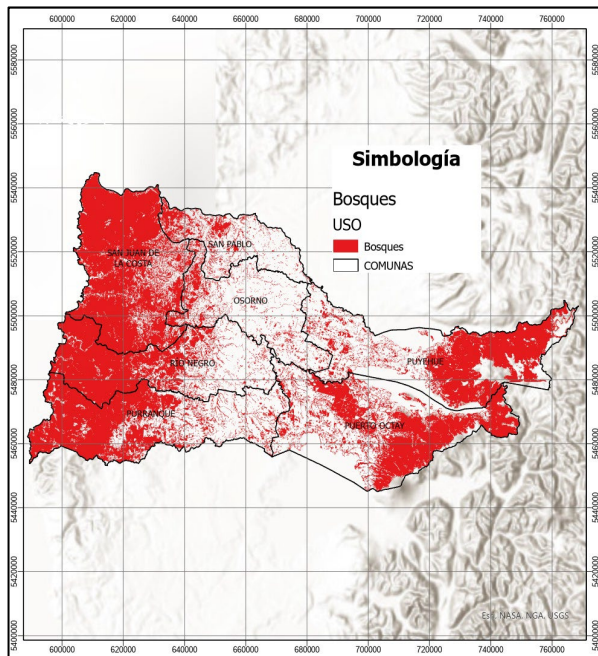


Figura 8. Mapa de Uso de Suelo: Bosques. *Elaboración propia.*

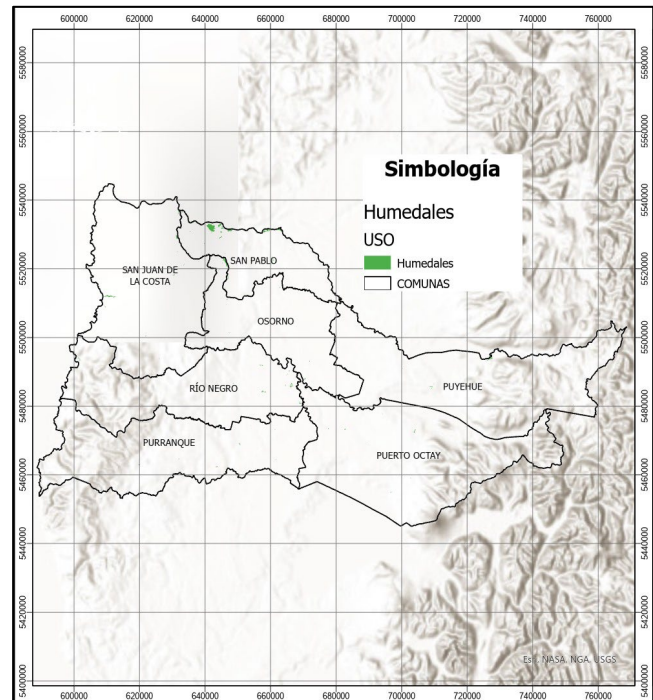


Figura 10. Mapa de Uso de Suelo: Humedales. *Elaboración propia.*

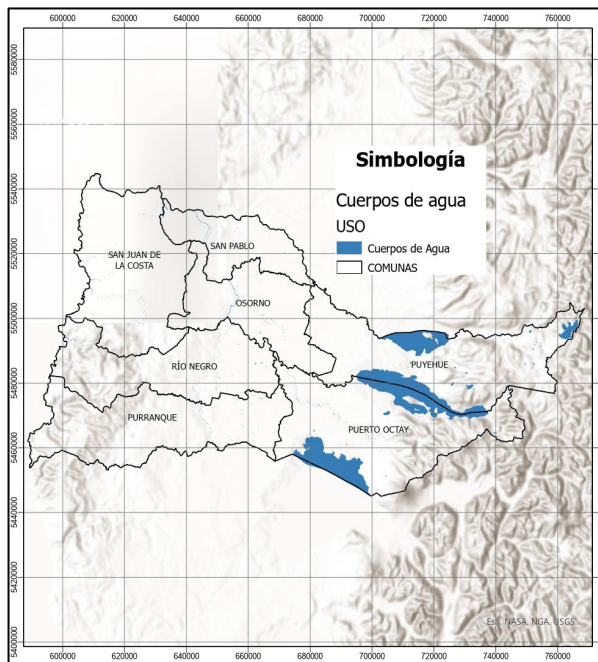


Figura 9. Mapa de Uso de Suelo: Cuerpos de agua. *Elaboración propia.*



Figura 11: Mapa de Uso de Suelo: Áreas desprovistas de vegetación. *Elaboración propia.*

Análisis temporal de la temperatura de nivel de suelo en la provincia de Osorno mediante el uso de teledetección

Opazo Samuel Antonio, Rantul Guillermo Roberto, Carolina Gamboa, María Inés Díaz

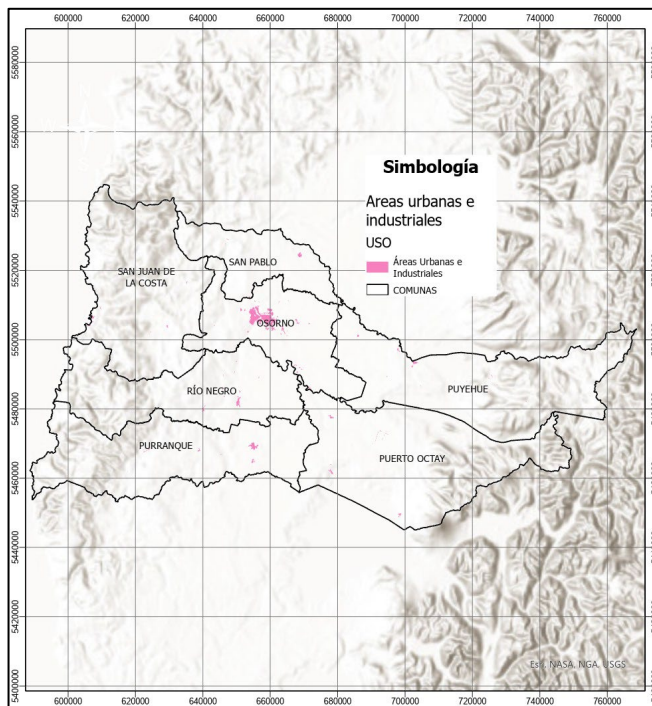


Figura 12: Mapa de Uso de Suelo: Áreas urbanas e industriales. *Elaboración propia.*

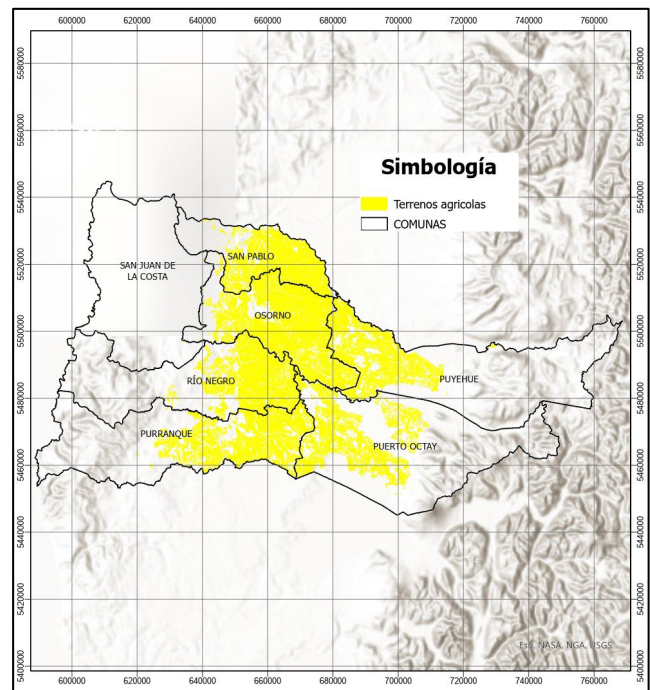


Figura 14: Mapa de Uso de Suelo: Terrenos agrícolas. *Elaboración propia.*

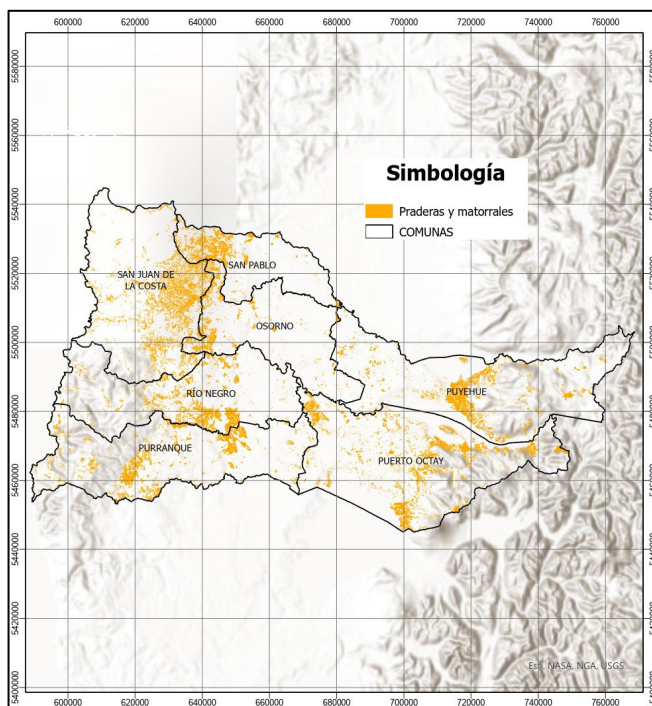


Figura 13: Mapa de Uso de Suelo: Praderas y Matorrales- *Elaboración propia.*

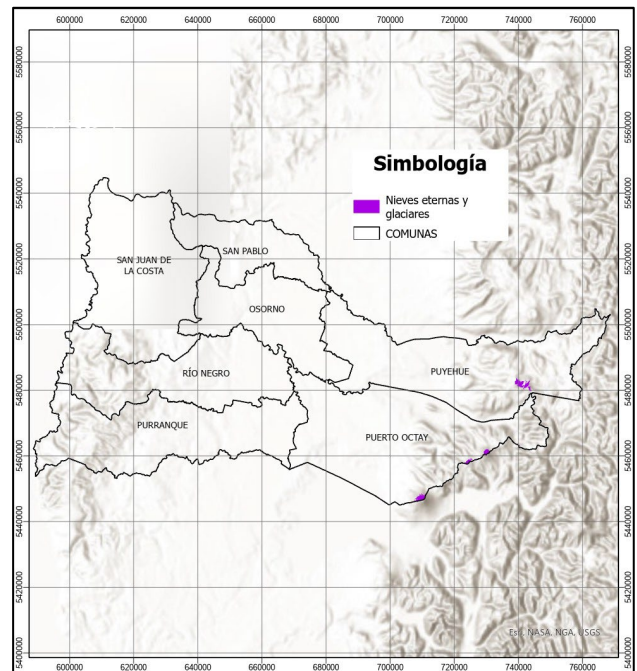


Figura 15: Mapa de Uso de Suelo: Nieves eternas y glaciares. *Elaboración propia.*

El análisis de las temperaturas a lo largo del tiempo para diferentes tipos de uso de suelo revela

patrones interesantes en la evolución de la temperatura entre 2014 y 2024.

A continuación, se muestra los gráficos con las temperaturas por cada año y por cada tipo de suelo (Figura 16 a 23):

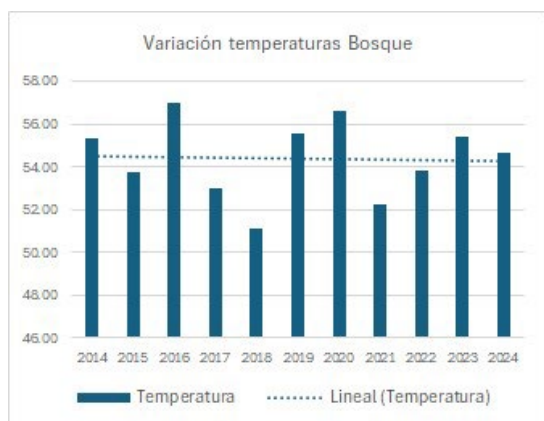


Figura 16: Gráfico de la variación temperaturas en uso de suelos Bosques. *Elaboración propia.*

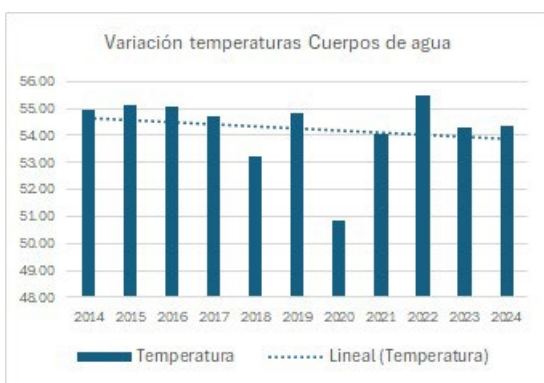


Figura 17: Gráfico de variación de temperaturas en uso de suelos Cursos de agua. *Elaboración propia.*

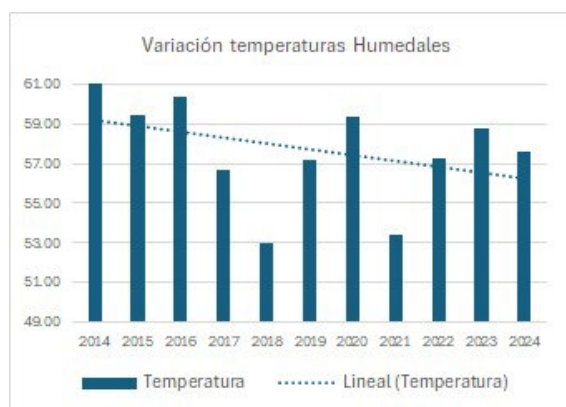


Figura 18: Gráfico de variación de temperaturas en uso de suelos Humedales. *Elaboración propia.*

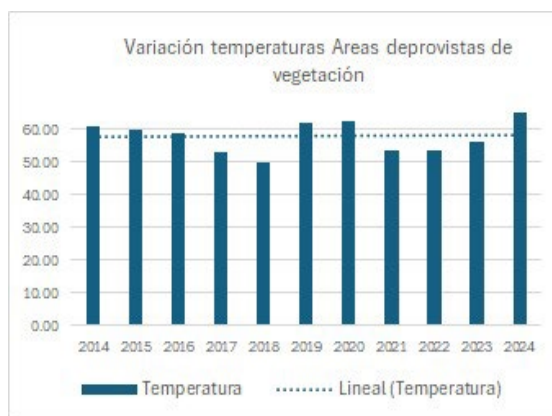


Figura 19: Gráfico de variación de temperaturas en uso de suelos Áreas desprovistas de vegetación. *Elaboración propia.*

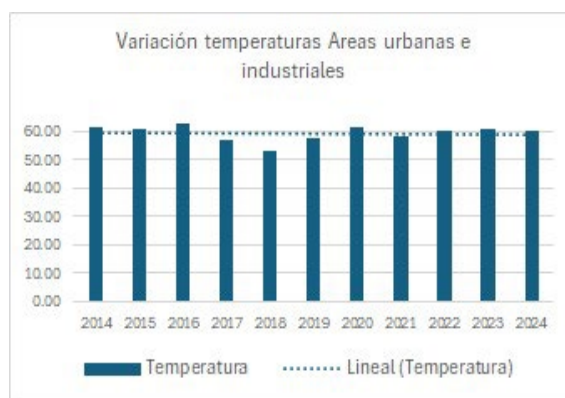


Figura 20: Gráfico de variación de temperaturas en uso de suelos Áreas urbanas e industriales. *Elaboración propia.*

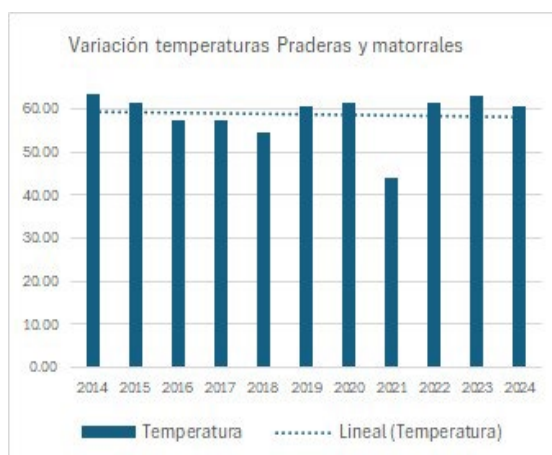


Figura 21: Gráfico de variación de temperaturas en uso de suelos Praderas y matorrales. *Elaboración propia.*

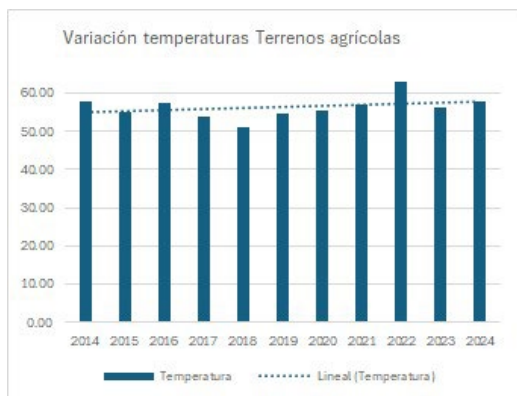


Figura 22: Gráfico de variación de temperaturas en uso de suelos Terrenos agrícolas. Fuente: *Elaboración propia.*

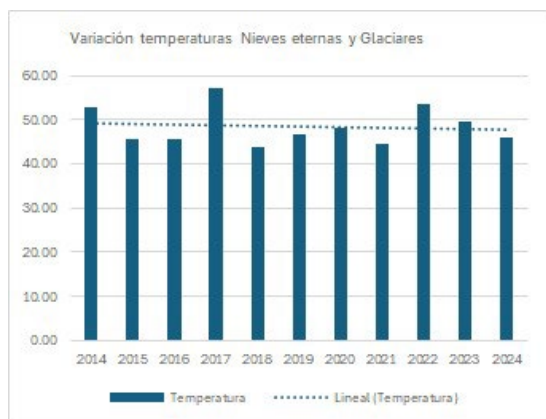


Figura 23: Gráfico de variación de temperaturas en uso de suelos Nieves eternas y glaciares. *Elaboración propia.*

En la figura 24 se muestra la gráfica de la tendencia de temperatura para cada tipo de uso de suelo entre 2014 y 2024. Cada línea representa un tipo de uso de suelo, mostrando cómo han variado las temperaturas a lo largo de los años.

El análisis de las temperaturas a lo largo del tiempo para diferentes tipos de uso de suelo revela que no existe un patrón definido, sino que es variable en la evolución de la temperatura entre 2014 y 2024. A continuación, se desglosa el comportamiento de cada tipo de uso:

- **Bosque:** Las temperaturas en áreas boscosas han mantenido una tendencia relativamente estable, con fluctuaciones moderadas. Aunque hay ligeras variaciones anuales, no se observan picos o caídas extremas en comparación con otros tipos de uso de suelo. El cambio porcentual promedio es cercano a

cero, lo que indica una estabilidad en la temperatura de estas zonas.

- **Cuerpos de Agua:** Las temperaturas en los cuerpos de agua presentan una ligera tendencia descendente en su cambio porcentual promedio. A pesar de esto, los valores anuales no muestran grandes oscilaciones, y se mantienen en un rango más constante que en otros tipos de uso. Esto podría deberse a la capacidad del agua para regular la temperatura, evitando fluctuaciones significativas.
- **Humedales:** Los humedales han experimentado una leve disminución en el cambio porcentual promedio de la temperatura. Se observa una caída de temperatura significativa alrededor de 2017, seguida de un repunte en años posteriores. Los humedales parecen ser sensibles a las variaciones anuales, probablemente debido a su dependencia de las condiciones de humedad y clima.
- **Áreas Desprovistas de Vegetación:** Este tipo de uso presenta una de las tendencias de temperatura más inestables y volátiles. Con un cambio porcentual promedio positivo considerable, los valores muestran aumentos marcados en los años recientes, especialmente alrededor de 2023 y 2024. La ausencia de vegetación puede contribuir a una mayor absorción de calor, lo que podría explicar el aumento en las temperaturas.
- **Áreas Urbanas:** Las zonas urbanas reflejan una tendencia ascendente en sus temperaturas a lo largo de la década. Este incremento puede estar relacionado con el efecto de isla de calor urbana, donde la concentración de materiales que retienen el calor (como concreto y asfalto) eleva la temperatura. Aunque existen variaciones en algunos años, el aumento general sugiere una tendencia a un calentamiento continuo en las áreas urbanas.
- **Praderas y Matorrales:** Estas zonas presentan un cambio porcentual promedio positivo, con un comportamiento algo errático en algunos años. En particular, después de 2019, las temperaturas muestran un aumento, alcanzando picos alrededor de 2023 y 2024. Esta variabilidad podría asociarse con cambios

en la cobertura vegetal y la exposición directa al sol.

- **Terrenos Agrícolas:** Las áreas agrícolas muestran una tendencia de temperaturas fluctuantes, con caídas y aumentos significativos en ciertos años. La agricultura depende en gran medida de las prácticas de manejo y de las condiciones climáticas, lo cual puede explicar la variabilidad en las temperaturas. Sin embargo, hay un incremento marcado en los últimos años, lo que podría indicar una sensibilidad a los cambios climáticos recientes.
- **Nieves Eternas y Glaciares:** Este tipo de uso de suelo registra la temperatura promedio más baja, como era de esperar. Sin embargo, el cambio porcentual promedio es negativo, indicando una ligera tendencia a la disminución de temperatura. En años recientes, como 2023 y 2024, se observa un descenso considerable en las temperaturas, lo cual puede reflejar la pérdida de cobertura de nieve o cambios en las condiciones climáticas en estas áreas.

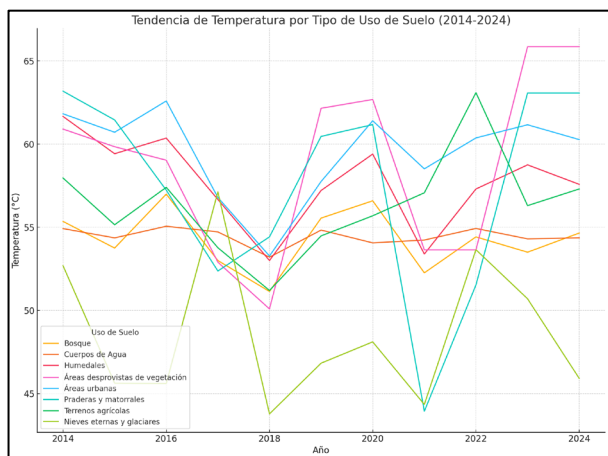


Figura 24: Gráfico de tendencia de temperatura por tipo de uso de suelo (2014-2024). *Elaboración propia*

5. DISCUSIÓN GENERAL

Los primeros resultados de temperaturas superficiales muestran valores altos que nos parecieron errados, pero al revisar la metodología, analizar y comparar con otras zonas geográficas llegamos a la conclusión que los valores entregados son válidos.

Los resultados indican una tendencia de aumento progresivo en las temperaturas superficiales del suelo en la provincia de Osorno, con variaciones que no son significativas asociadas a cambios en el uso del suelo y eventos climáticos extremos. Sin embargo, el análisis sugiere que el cambio climático está contribuyendo a estas variaciones, especialmente con el aumento de temperaturas extremas durante los meses de verano. Además, las actividades humanas, como la deforestación y la urbanización, han agravado este fenómeno, particularmente en áreas donde la cobertura vegetal ha sido reducida o reemplazada por monocultivos o construcciones urbanas.

La relación entre el NDVI y las temperaturas superficiales evidencia la importancia de la vegetación en la regulación de las temperaturas del suelo. Las áreas con mayor vegetación presentan temperaturas más bajas, mientras que las áreas más expuestas muestran un aumento considerable. Este hallazgo resalta la necesidad de estrategias de manejo sostenible del suelo y conservación de los ecosistemas nativos, especialmente se consolida la necesidad de conservar humedales, cuerpos y cursos de agua, conservación del bosque nativo, sobre todo en el contexto del cambio climático.

5.1. Preguntas de discusión:

Impacto del Cambio Climático en los Ecosistemas y Uso del Suelo:

- 1) Pregunta para discusión: ¿Cómo afecta el cambio climático de forma diferenciada a cada tipo de uso de suelo?

Descripción: El análisis muestra tendencias de aumento en las temperaturas en áreas urbanas y desprovistas de vegetación, lo cual podría estar asociado con el cambio climático y el calentamiento global. Discutir cómo estos cambios podrían afectar la biodiversidad, la disponibilidad de agua y la calidad del suelo en cada tipo de uso, y qué acciones de mitigación se pueden implementar para proteger los ecosistemas más vulnerables.

El Rol de las Áreas Naturales en la Regulación de la Temperatura:

- 2) Pregunta para discusión: ¿Qué importancia tienen los bosques, humedales y cuerpos de

agua en la regulación de la temperatura regional?

Descripción: Los bosques y cuerpos de agua han mostrado una relativa estabilidad en las temperaturas, lo cual resalta su rol en la regulación climática. Explorar cómo estas áreas pueden ayudar a contrarrestar los efectos de la urbanización y el calentamiento, y la necesidad de su conservación para evitar la degradación ambiental.

Urbanización y el Efecto de Isla de Calor:

- 3) Pregunta para discusión: ¿Qué estrategias pueden implementarse para reducir el efecto de isla de calor en las áreas urbanas?

Descripción: La tendencia de aumento de temperatura en las áreas urbanas sugiere la influencia del efecto de isla de calor. Discutir medidas como el aumento de espacios verdes urbanos, techos verdes y materiales de construcción sostenibles, que podrían mitigar este efecto. También, analizar el papel de la planificación urbana y el diseño de ciudades sostenibles para reducir el impacto del calor en las zonas densamente pobladas.

Agricultura y Sustentabilidad Frente a las Fluctuaciones Climáticas:

- 4) Pregunta para discusión: ¿Cómo pueden adaptarse las prácticas agrícolas para enfrentar las variaciones climáticas y el aumento de la temperatura?

Descripción: Las áreas agrícolas muestran fluctuaciones significativas en temperatura, lo que puede afectar la productividad y la sostenibilidad de los cultivos. Debatir sobre técnicas agrícolas adaptativas, como la agricultura de conservación, el uso de cultivos resistentes al clima y prácticas de riego sostenibles, que podrían ayudar a minimizar el impacto de las variaciones climáticas y asegurar la seguridad alimentaria.

Importancia de la Restauración de Áreas Desprovistas de Vegetación:

- 5) Pregunta para discusión: ¿Deberían implementarse programas de restauración de áreas desprovistas de vegetación para reducir el aumento de la temperatura?

Descripción: Las áreas desprovistas de vegetación muestran un notable incremento en la temperatura, lo que resalta la importancia de la cobertura vegetal para el equilibrio térmico. Examinar los beneficios de programas de reforestación y restauración en estas áreas, y cómo estos pueden contribuir a la reducción de la temperatura y la mejora de la calidad del suelo y el agua.

Conservación de Glaciares y Zonas de Nieve en el Contexto del Calentamiento Global:

- 6) Pregunta para discusión: ¿Qué políticas y acciones deben implementarse para conservar los glaciares y áreas de nieve eterna?

Descripción: Las zonas de nieves eternas y glaciares, aunque tienen temperaturas más bajas, están experimentando aumento de temperatura que podrían indicar pérdida de cobertura de nieve y glaciares. Debatir sobre la importancia de estas áreas en la regulación del ciclo hidrológico y su papel en el abastecimiento de agua. También, explorar posibles estrategias de conservación frente al calentamiento global y la pérdida de hielo.

Praderas y Matorrales: Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático:

- 7) Pregunta para discusión: ¿Qué medidas pueden ayudar a proteger las praderas y matorrales del aumento de la temperatura?

Descripción: Las praderas y matorrales han mostrado una tendencia al alza en la temperatura, lo que podría afectar la fauna y flora locales. Discutir sobre la importancia de estas áreas para la biodiversidad, el pastoreo y la cultura local, así como las posibles estrategias de manejo y adaptación que podrían implementarse para proteger estos ecosistemas.

Educación Ambiental y Conciencia Pública sobre los Cambios de Temperatura:

- 8) Pregunta para discusión: ¿Cómo puede la educación ambiental contribuir a aumentar la conciencia sobre el impacto del cambio de uso de suelo en el clima?

Descripción: La educación ambiental puede desempeñar un rol crucial en la concienciación pública sobre cómo los cambios en el uso de suelo afectan la temperatura y el clima. Discutir sobre estrategias de educación y comunicación que

podrían implementarse para involucrar a la comunidad en la conservación y protección de los distintos tipos de suelo, especialmente en zonas urbanas y agrícolas.

Por otro lado, el uso de imágenes Landsat 8 ha demostrado ser una herramienta efectiva para el monitoreo de cambios en la temperatura superficial del suelo y su relación con el uso del suelo en escalas temporales y espaciales amplias. Esto subraya la importancia de continuar con este tipo de estudios para evaluar el impacto a largo plazo de los cambios ambientales y climáticos en la región.

Un tema importante relacionado al uso de imágenes satelitales en la zona geográfica escogida tiene relación con dos temas importantes, uno es la resolución temporal de la imagen y el otro con la cobertura de nubes en la zona, esto nos proporcionó un tiempo muy limitado de condiciones ideales para el análisis de dichas imágenes, aun así, la tendencia mostrada sigue el patrón de las temperaturas ambiente y de la cantidad de agua caída, todos los datos indican que la temperatura ha ido en aumento de manera constante pero no violenta.

6. CONCLUSIONES

Aumento progresivo de la temperatura superficial del suelo: Los datos de Landsat 8 demuestran una tendencia al alza en la temperatura superficial en algunos tipos de suelo en la provincia de Osorno durante el período 2014-2024. Este aumento se correlaciona con el cambio climático global y se ha observado con mayor intensidad en los meses de verano, lo que subraya la vulnerabilidad de la región ante el calentamiento global.

6.1. Importancia de la cobertura vegetal en la regulación térmica:

El análisis de NDVI y las temperaturas superficiales revelan que las áreas con mayor densidad de vegetación tienden a presentar temperaturas significativamente más bajas que las zonas urbanizadas o agrícolas. Esto reafirma el papel crucial de la vegetación nativa en la regulación térmica del suelo y en la mitigación de los efectos del cambio climático, especialmente en áreas sensibles como humedales y bosques nativos.

6.2. Impacto de las actividades humanas:

La deforestación, la expansión de monocultivos y la urbanización han incrementado las variaciones térmicas al reducir la cobertura vegetal, lo cual exacerba el calentamiento en áreas expuestas. La intervención humana ha acelerado el cambio en los ecosistemas locales, sugiriendo la necesidad de implementar políticas de conservación más estrictas y sostenibles para preservar el equilibrio ecológico de la región.

6.3. Eficacia de la teledetección en estudios climáticos a largo plazo:

Las imágenes satelitales de Landsat 8 resultaron ser una herramienta valiosa para monitorear los cambios en la temperatura superficial del suelo a lo largo del tiempo y en diferentes tipos de uso del suelo, más aún, considerando que al buscar información detallada de este tipo de análisis nos dimos cuenta que no existe. La metodología desarrollada permitió una visualización precisa y regular de las tendencias climáticas a escala espacial y temporal, proporcionando un enfoque eficiente para la evaluación de impactos ambientales y climáticos en la región.

6.4. Limitaciones y recomendaciones para futuros estudios:

Las limitaciones derivadas de la resolución temporal de las imágenes y la frecuente cobertura de nubes en la provincia de Osorno restringieron el análisis en ciertos períodos. Sin embargo, el patrón de aumento constante en algunos casos y variable en otros, en la temperatura del suelo se mantuvo, apoyando las conclusiones sobre el cambio climático en la región. Es recomendable que futuros estudios exploren alternativas para mejorar la frecuencia y calidad de los datos, como el uso de imágenes de satélites con mejor resolución temporal, técnicas avanzadas para reducir la interferencia de nubes y generación de imágenes a partir de tecnologías que usen fotogrametría y sistemas Lidar con sensores térmicos, especialmente en zonas con evidencias de cambios a corto plazo.

7. REFERENCIAS

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils* (14th ed. revised). Pearson Prentice Hall.

Berdugo Muñoz, A. G. (2016). Teledetección y aplicaciones en el análisis del territorio. *Revista de Geografía y Ciencias Sociales*.

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2023). Impactos del cambio climático en la región de Los Lagos: Un análisis integral. Recuperado de: <http://www.cr2.cl>

Centro de Información de Recursos Naturales. (2012). *Estudio agrológico Región de Los Lagos: Descripción de suelos, materiales y símbolos, 2012. Sobre ortoimágenes a escala de salida 1:10.000* (Pub. CIREN N°184/2012). <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/87fc4f6b-5d50-468f-b482-17543ccd7a8b>

Dirección Meteorológica de Chile (DMC). (2021). Informe sobre variabilidad climática en Chile: Análisis de precipitaciones y temperaturas. Recuperado de: <https://www.meteochile.gob.cl>

GIS & Beers. (2019, noviembre). *Cálculo de temperatura superficial (LST) con Landsat 8*. GIS & Beers. <https://www.gisandbeers.com/calculo-de-temperatura-superficial-lst-con-landsat-8/>

Ilustre Municipalidad de Osorno. (2019). *Ordenanza local N°2/2019*. https://www.municipalidadesosorno.cl/archivos/ORDENANZA_LOCAL_2_2019.pdf

Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, J., Anderson, R. G., & Zhu, Z. (2014). *Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. Remote Sensing of Environment*. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.001

Salinero, E. C. (2008). Teledetección ambiental. Ariel ciencia.

Urrutia, R., & Vuille, M. (2009). Variabilidad climática y cambio de temperatura en los Andes del sur de Chile: Implicancias para la región de Osorno. *Global and Planetary Change*, 72(4), 235-246. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.03.014

Vanegas, L. (2015). Procesos de teledetección en la medición de temperaturas superficiales. *Revista de Geociencias y Tecnología Ambiental*.

Veneros, Jaris, García, Ligia, Morales, Eli, Gómez, Víctor, Torres, Mariana, & López-Morales, Fernando. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, 38(4), 99-107. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099>

Zwinkels, J. (2015). Light, electromagnetic spectrum. In R. Luo (Ed.), *Encyclopedia of color science and technology*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_204-1