

# Relación entre las variables meteorológicas con la salinidad de un suelo en la Región de Los Lagos

Carolina Vargas

## 1 Introducción

El cambio climático es un fenómeno que cada vez se hace más relevante. Dentro de sus manifestaciones se encuentra el incremento de las temperaturas, mayores sequías y el aumento del nivel del mar. Este último, ha cobrado gran relevancia en los últimos años, siendo particularmente importantes los procesos de intrusión marina que puede generar, siendo un fenómeno que afecta las zonas costeras debido al desplazamiento temporal o permanente del agua salada hacia el interior de la tierra, reemplazando el agua dulce de los acuíferos (López-Geta y Gómez-Gómez, 2007). Este fenómeno es causado por la entrada de maremotos, acuíferos subterráneos o el transporte de sal con el viento (Talat, 2020).

Dentro de los impactos asociados a la intrusión marina, ésta aumenta la salinidad de las aguas subterráneas, lo que contamina los acuíferos costeros, limitando su aprovechamiento para diversos usos (López-Geta y Gómez-Gómez, 2007). Además, provoca que las especies vegetales presentes en los suelos costeros se vean afectadas negativamente debido a la intolerancia a los altos niveles de sales en los suelos, reduciendo la productividad de los cultivos en estas zonas (Gibson et al., 2021).

Teniendo en consideración la extensa línea de costa de nuestro país, es relevante analizar este tipo de fenómenos. En esta misma línea, el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) en el 2019, identificó en el estudio “Determinación del Riesgo de los Impactos del Cambio Climático en las costas de Chile” las zonas más susceptibles (por debajo de los 10 m.s.n.m.) a la intrusión marina en comunas costeras del país. Hualpén, en la Región del Biobío, resultó ser la comuna más expuesta, seguida por Talcahuano de la misma región, Puerto Saavedra (Región de la Araucanía) y Maullín (Región de Los Lagos), con un 49%, 47%, 39% y 34% del total comunal, respectivamente (MMA, 2019). Particularmente, en la Región de Los Lagos se identificaron cinco comunas potencialmente afectadas por el aumento del nivel del mar, siendo estas las localidades de Maullín, Calbuco, Quinchao, Quemchi y Ancud (MMA, 2019). Esta región se

caracteriza por presentar suelos derivados de cenizas volcánicas, permitiendo el desarrollo de Andisoles por las condiciones climáticas templadas y lluviosas (Salazar et al., 2022).

Por otro lado, para el monitoreo preciso de las condiciones del suelo y la calidad del agua existen diversos sensores que se basan en principios físicos como la capacitancia dieléctrica, reflectometría de dominio del tiempo (TDR), reflectometría de dominio de frecuencia (FDR), entre otros (Ritter y Regalado, 2007). Por otro lado, algunos estudios han detectado que los sensores TEROS-12 de la marca Meter Group presentó una mayor precisión y confiabilidad en comparación con los otros dispositivos, posicionándolo como una herramienta adecuada para estudios de campo en condiciones variables de salinidad (Campbell et al., 2022).

A partir de la información presentada anteriormente, se establece el objetivo de analizar la relación de las variables meteorológicas en la salinidad de un suelo de la Región de Los Lagos.

## **2 Pregunta de investigación**

¿De qué manera las variables meteorológicas (precipitación, temperatura, velocidad del viento) afectan en el nivel de salinidad del suelo?

## **3 Hipótesis**

Una menor precipitación, mayor temperatura y mayor velocidad del viento determina un mayor valor de conductividad eléctrica en los horizontes más superficiales del suelo

## **4 Objetivo**

Analizar la relación de las variables meteorológicas en la salinidad de un suelo de la Región de Los Lagos.

## **5 Metodología**

Para llevar a cabo la investigación, se utilizaron los datos obtenidos de los siguientes instrumentos (ambos entregan datos cada 15 minutos):

- Estación meteorológica ATMOS-41, diseñadas para el monitoreo continuo de variables meteorológicas como la temperatura del aire, precipitación y velocidad del viento.
- Sensor TEROS-12 (Decagon Devices), que medirán la conductividad eléctrica del suelo.

A partir de los códigos presentados en el repositorio de github sobre “dinámica en un suelo costero” (<https://github.com/CarolinaVB8/dinamica-en-un-suelo-costero>) se obtuvieron los resultados que observamos a continuación

## 6 Resultados

### 6.1 Variabilidad de los datos meteorológicos

A partir de 46752 datos iniciales tanto para las variables meteorológicas como para la conductividad eléctrica, se filtraron los datos con el fin de generar una base de datos en la que no existieran valores “NA”, lo que determinó una base de datos compuesta por 147 observaciones por cada variable. Lo anterior ocurrió debido a que la conductividad eléctrica no fue detectada durante gran parte del estudio, además de que los eventos de precipitación hacen que la salinidad superficial del suelo disminuya hasta rangos indetectables, por lo que no fue posible obtener una mayor cantidad de datos.

Teniendo en consideración lo anterior, se generó la Figura 1, la cual muestra la variabilidad de la precipitación, temperatura del aire y velocidad del viento durante los meses de marzo a agosto de 2025.

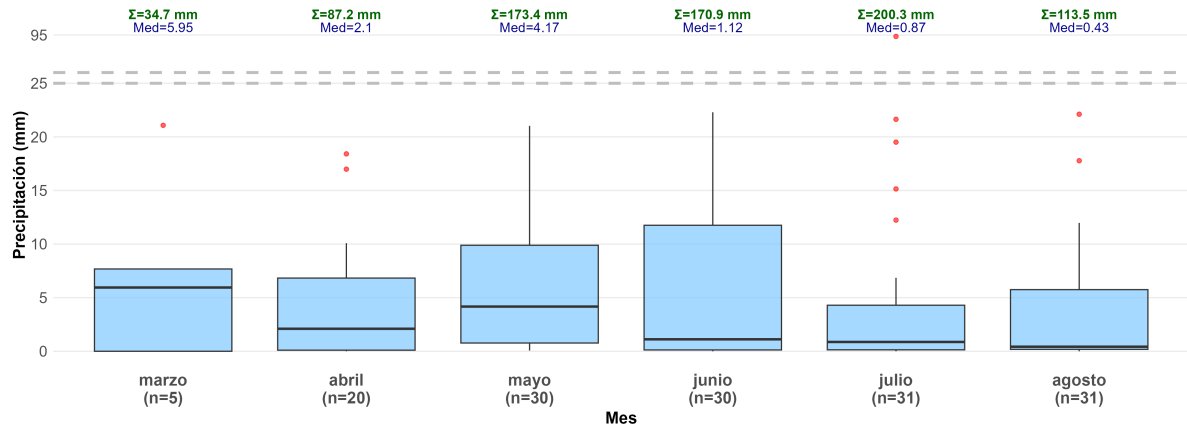
La precipitación aumenta de manera progresiva desde marzo hacia un máximo en julio, lo cual coincide con la estacionalidad típica del sur de Chile. Cabe destacar que julio presentó una gran cantidad de eventos de precipitación copiosa, presentando una gran cantidad de outliers. Sin embargo, este mes tuvo una mediana baja (0.87 mm), lo que indica que la mayoría de los días son de lluvia débil, intercalados con eventos de mayor intensidad. En contraste, marzo y abril tienen medianas moderadas y menor dispersión, típico de fin de verano-otoño.

Respecto a la temperatura, esta descende de manera casi lineal desde marzo (mediana = 15.4°C) hasta junio (mediana = 8.08°C), manteniéndose baja en julio y agosto. Por otro lado, abril mostró la menor dispersión, lo que indica temperaturas más estables, mientras que para los meses de invierno la variabilidad aumenta ligeramente.

Ahora bien, la velocidad del viento presentó una variabilidad moderada, donde no existe un patrón estacional tan claro. En general, la tendencia se mantiene a lo largo de los meses, donde la mediana varió entre 1.78 y 2.69 m/s. Asimismo, se presentó una baja cantidad de outliers, lo que sugiere ráfagas ocasionales, pero no representan una característica permanente del periodo.

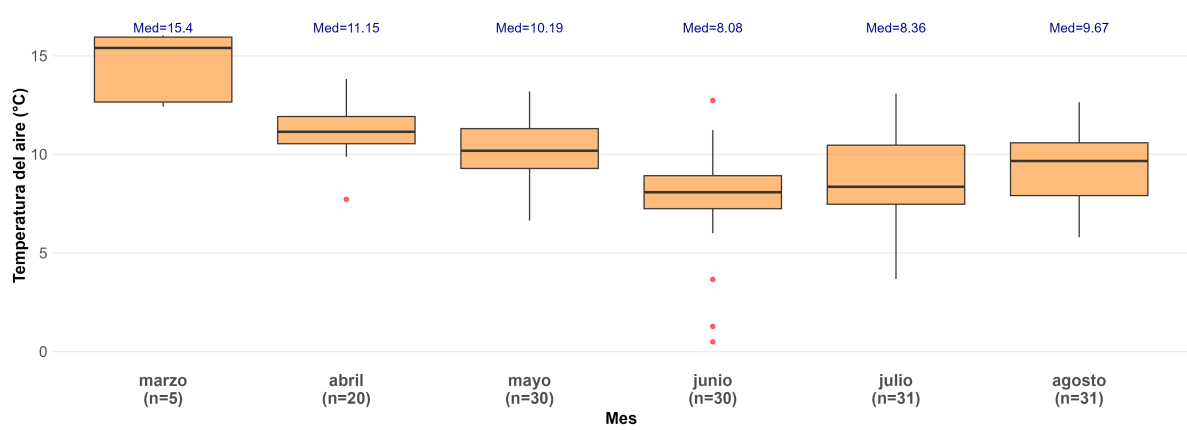
### Variabilidad de la precipitación dentro de cada mes

Período: 2025-03-02 a 2025-08-31



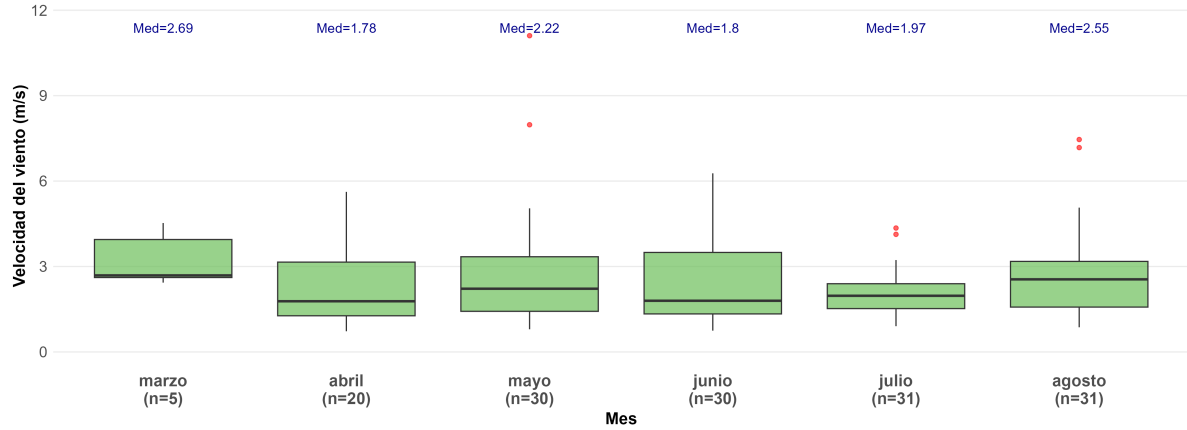
### Variabilidad de la temperatura del aire dentro de cada mes

Período: 2025-03-02 a 2025-08-31



### Variabilidad de la velocidad del viento dentro de cada mes

Período: 2025-03-02 a 2025-08-31



**Figura 1.** Boxplots por variable meteorológica a lo largo del tiempo

## **6.2 Evolución de las variables meteorológicas en comparación con la conductividad eléctrica del suelo**

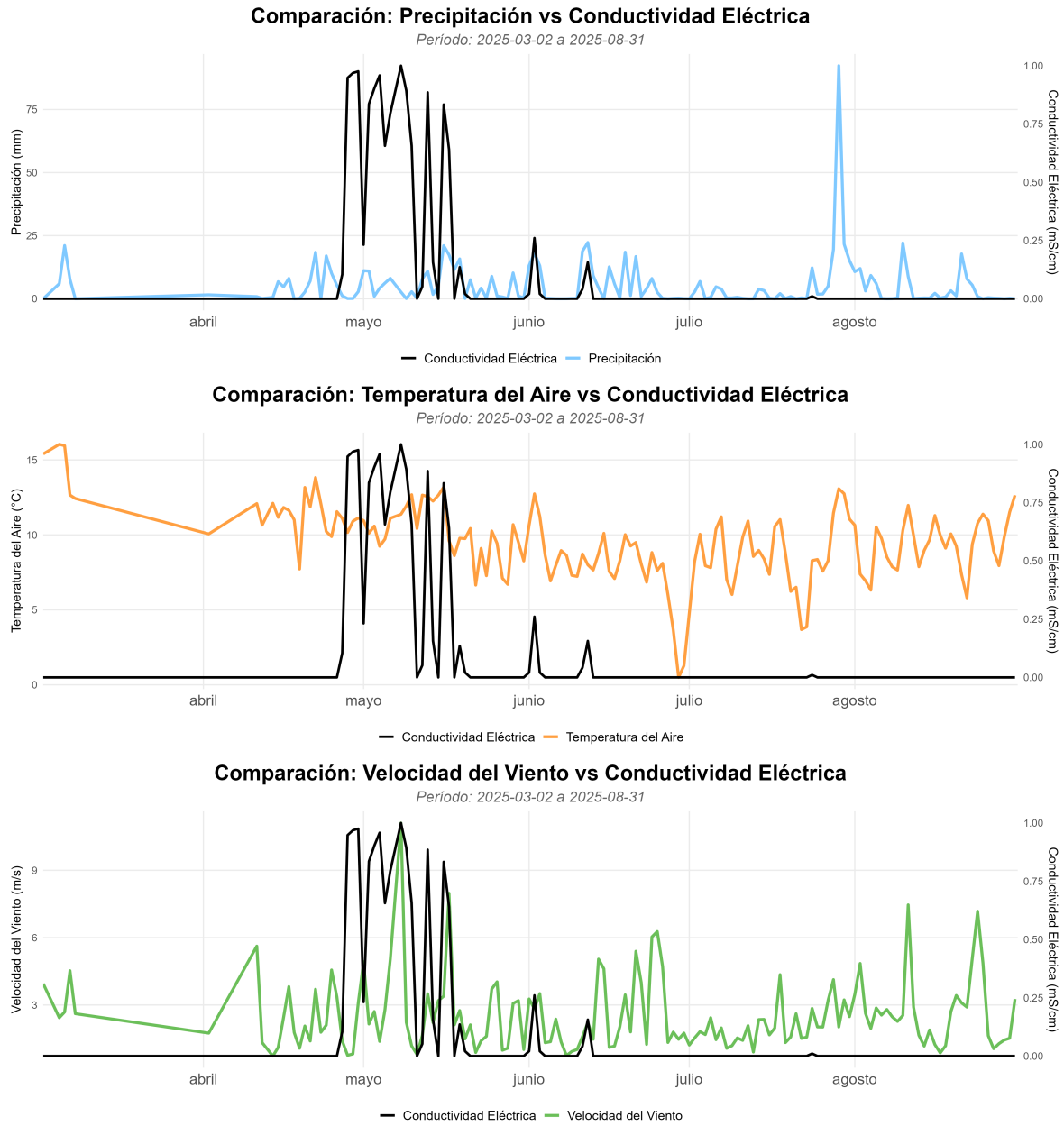
Utilizando los datos depurados, se procedió al cruce de información entre variables. En la Figura 2 se presenta la comparación temporal entre la conductividad eléctrica del suelo (CE) y tres variables meteorológicas —precipitación, temperatura del aire y velocidad del viento— para el periodo comprendido entre marzo y agosto de 2025. En general, los gráficos permiten identificar patrones conjuntos y posibles respuestas de la CE frente a eventos climáticos.

En primer lugar, la comparación entre precipitación y CE muestra que la CE presenta un conjunto de valores altos concentrados entre fines de abril y mediados de mayo, coincidiendo con un periodo donde la precipitación comienza a aumentar: es posible detectar que los eventos de precipitación influyen en la CE, ya que cada vez que existió un leve peak de lluvia ocurrió una disminución importante en la CE. Por otra parte, desde mediados de junio en adelante los valores de CE disminuyen hasta llegar a 0, lo cual se estaría explicando por el continuo lavado de sales por los eventos de precipitación en la zona.

Por otro lado, la comparación entre temperatura del aire y CE muestra que los máximos de CE se producen cuando las temperaturas aún son relativamente altas (entre 10 °C y 15 °C), y desaparecen cuando la temperatura desciende en mayo–julio. Esto indica que la dinámica de CE podría estar asociada a procesos que dependen de condiciones térmicas más cálidas, tales como actividad biogeoquímica, movilidad iónica o variación del contenido de sales en el perfil superficial del suelo.

Finalmente, la comparación entre velocidad del viento y CE revela que los máximos de CE se concentran en un periodo donde el viento presenta valores moderados, sin evidenciar una relación directa entre ambas variables. Durante los meses posteriores, la CE se mantiene en niveles muy bajos independientemente del aumento paulatino de la velocidad del viento.

En conjunto, la figura evidencia que la CE muestra un comportamiento altamente episódico y restringido temporalmente, cuya variación no sigue de manera lineal ni directa la dinámica de las variables meteorológicas evaluadas; por el contrario, parece responder a condiciones específicas ocurridas en un periodo acotado del otoño, lo que sugiere la influencia de procesos hidrológicos o edáficos puntuales más que una relación simple con los factores climáticos diarios.



**Figura 2.** Comparación entre cada variable meteorológica con la conductividad eléctrica del suelo

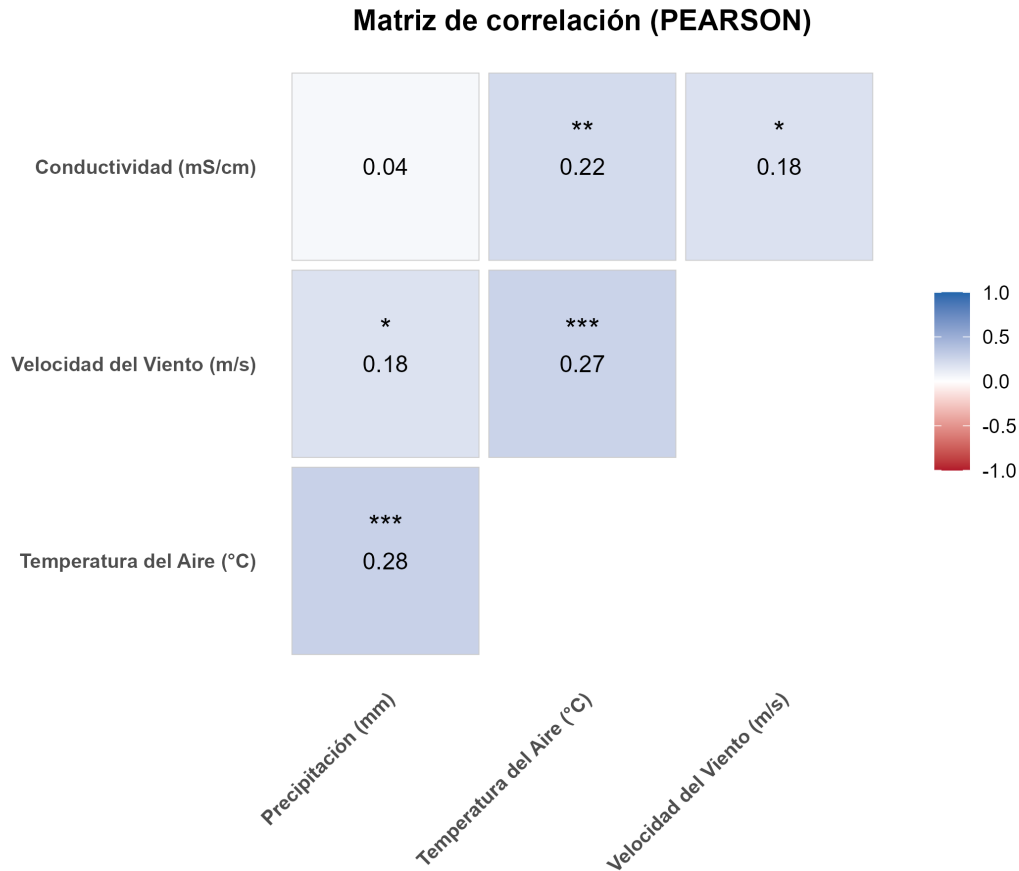
### 6.3 Análisis de correlación entre las variables

En la Figura 3 se muestra la matriz de correlación de Pearson, la cual resume las relaciones lineales entre la CE del suelo y las variables meteorológicas analizadas durante el periodo de estudio.

En primer lugar, la CE muestra correlaciones positivas, aunque débiles, con la temperatura del aire ( $r = 0.22$ ,  $p < 0.01$ ) y con la velocidad del viento ( $r = 0.18$ ,  $p < 0.05$ ), lo que indica que niveles más altos de temperatura y viento tienden a asociarse con ligeros incrementos en la conductividad, aun cuando la magnitud de estas asociaciones es limitada. En contraste, la relación entre precipitación y CE es prácticamente nula ( $r = 0.04$ ), lo que sugiere que la lluvia diaria no explica de manera significativa la variabilidad de la conductividad eléctrica durante el periodo analizado.

Por otro lado, las correlaciones entre las variables meteorológicas muestran asociaciones de mayor magnitud: la temperatura presenta una correlación positiva moderada con la velocidad del viento ( $r = 0.27$ ,  $p < 0.001$ ), y una correlación también positiva con la precipitación ( $r = 0.28$ ,  $p < 0.001$ ), lo que evidencia que los días más cálidos tienden a coincidir con mayores velocidades de viento y con eventos de precipitación dentro del conjunto de datos.

En conjunto, la figura refleja que, aunque algunas de las variables climáticas presentan relaciones estadísticamente significativas entre sí, su influencia directa sobre la conductividad eléctrica del suelo es acotada, lo que respalda la idea de que la CE responde a procesos edáficos específicos más que a los forzantes meteorológicos diarios de manera lineal.



**Figura 3.** Matriz de correlación entre las variables en estudio. Los asteriscos corresponden a un nivel de significancia de  $p < 0.05$  ( \* ),  $p < 0.01$  ( \*\* ) y  $p < 0.001$  ( \*\*\* ).

## 7 Conclusiones

Esta investigación permitió analizar las relaciones que existen entre las variables meteorológicas de una estación ATMOS-21 con la conductividad eléctrica del suelo medida mediante TEROS-12.

En primer lugar, la CE muestra variabilidad marcada entre meses, con incrementos notorios durante ciertos periodos del año, lo que sugiere influencia estacional. En los boxplots se observa que algunos meses presentan mayor dispersión y presencia de valores altos, indicando potenciales eventos puntuales de salinización o variaciones abruptas en el contenido de sales. La serie temporal revela tendencias y pulsos donde la CE aumenta en sincronía con condiciones atmosféricas específicas, lo que respalda la existencia de una respuesta más compleja del suelo.



La comparación de series temporales muestra que la CE tiende a aumentar en periodos de menor precipitación y mayor estabilidad atmosférica, consistente con procesos de evaporación y concentración de solutos. En cambio, durante eventos de lluvia, se observan descensos temporales o estabilización de la CE, lo que coincide con procesos de lixiviación o dilución.

Por otra parte, la CE aparece negativamente correlacionada con la precipitación, reforzando la interpretación de que los eventos de lluvia reducen la conductividad por lavado de sales. Con la temperatura puede existir una correlación positiva o débil, dependiendo del sitio o del periodo, pero suele reflejar una integración indirecta entre evapotranspiración y concentración de sales.

Asimismo, la CE demostró ser un indicador sensible a la dinámica hídrica del suelo, especialmente a la disponibilidad de agua y a los procesos de evaporación–lixiviación. Sin embargo, se propone poder trabajar con una mayor cantidad de datos, con el fin de poder analizar las dinámicas temporales con un mayor nivel de precisión. Asimismo, se postula un análisis con “temporalidad desfasada”, donde se analice la CE respecto a las condiciones inmediatamente previas en el tiempo, esto porque la medición de la salinidad en el suelo responde a las condiciones ambientales y espaciales que ocurrieron en los momentos previos a la medición.

Finalmente, y respecto a la robustez del análisis, la ausencia de “NA” en las bases de datos final permitió trabajar con una matriz completa, lo que fortalece la confiabilidad de las correlaciones obtenidas. El uso de gráficos complementarios (boxplots, series temporales y heatmap) permite una visión integral: desde la distribución mensual, pasando por la evolución temporal, hasta la dependencia estadística entre variables.

## 8 Referencias

- Campbell, S., Campbell, C., Canha, M., Galloway, O., Rivera, L. y Cobos, D. 2022. Performance Evaluation of Research Grade Water Content Sensors Across Multiple Soil Types And Electrical Conductivities. Meter Group publications.
- Gibson, N., S. McNulty, C. Miller, M. Gavazzi, E. Worley, D. Keese y D. Hollinger. 2021. Identification, Mitigation, and Adaptation to Salinization on Working Lands in the U.S. Southeast. Southern Research Station General Technical Report SRS-259, Forest Service U.S. Department of Agriculture.
- López-Geta, J. y J. Gómez-Gómez. 2007. La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15(3): 266-273.
- Ministerio del Medio Ambiente [MMA]. 2019. Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile, 2da edición. Exposición de zonas costeras. Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Gobierno de Chile, Santiago.
- Ritter, A. y Regalado, C. 2007. Eficacia de un sensor de capacitancia para medir simultáneamente salinidad y contenido hídrico. *Estudio de la Zona No Saturada del Suelo*, 8, 145-151. [https://zonanosaturada.com/zns07/publications\\_files/area\\_2/12.pdf](https://zonanosaturada.com/zns07/publications_files/area_2/12.pdf)
- Salazar, O., M. Casanova, J. P. Fuentes, M. Galleguillos, F. Nájera, J. Pérez-Quezada, M. Pfeiffer, L. Renwich, O. Seguel & Y. Tapia. 2022. Soil research, management, and policy priorities in Chile. *Geoderma Regional*, 29.
- Talat, N. 2020. Alleviation of soil salinization and the management of saline soils, climate change, and soil interactions. *Climate Change and Soil Interactions*, 305–329.