

DINÁMICA DEL AGUA Y SALINIDAD DE UN HUMEDAL SALINO

Osvaldo Andrés Barbosa^{1*}, José Álvarez-Rogel² , Raúl Silvio Lavado³ 

¹ Departamento de Ciencias Agropecuarias, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de San Luis, Villa Mercedes, San Luis, Argentina.

² Departamento de Tecnología y Ciencia Agraria, ETSIA, UPCT, Cartagena, España.

³ Facultad de Agronomía-INBA, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

Los humedales salinos son ambientes permanentemente o frecuentemente inundados, exhibiendo suelos halohidromórficos y vegetación halófila. El objetivo fue estudiar los procesos de salinización/desalinización de los suelos y, en general, la dinámica del agua y las sales, en los suelos de un humedal salino. Se trata de la depresión denominada "Bajo Las Saladas", localizada en el centro oeste de la provincia de San Luis (Argentina). Se ubicaron cuarenta y siete freátímetros determinando la profundidad al nivel freático y su composición. Fuera de la depresión los suelos se clasificaron como Haplustoles énticos y dentro de ella como Ustortentes típicos y en la mayor parte del área como Epiacuentes típicos. Estos suelos salino-alcálicos presentan diferente profundidad de horizontes y en algunos casos, horizontes gley; y sostienen distintos tipos fisonómicos. Las variaciones del nivel freático responden a cada tipo fisonómico del sector y a la posición topográfica. Los valores de profundidad promedio para los tipos fisonómicos fueron: matorral halófilo, 0,90 m; parches de arbustal halófilo rastrero, 0,59 m; las praderas halófilas abierta y densa, 0,44 y 0,41 m, respectivamente; y la playa salina con 0,22 m. En las aguas freáticas predominan los sulfatos y el sodio. En las eflorescencias superficiales, el sulfato de sodio se presenta en sus dos variantes cristalográficas: Tenardita y Mirabilita. La modelización muestra que en la depresión salina predominan dos tipos de movimientos de agua: vertical, especialmente ascenso capilar del agua freática, y horizontal, dominado por el escurrimiento superficial. La conceptualización del movimiento de sales muestra que con vientos cálidos y secos se produce la deflagración de las sales, que se depositan en otros sectores de la depresión.

Palabras clave: modelos conceptuales, flujos de sales, nivel freático, eflorescencias salinas.

WATER DYNAMICS AND SALINITY IN A SALINE WETLAND

* Autor de contacto:
baldibarbosa@yahoo.com.ar

Recibido:
30-12-24

Recibido con revisiones:
30-03-25

Aceptado:
01-04-25

Este artículo está bajo
licencia internacional



La titularidad del derecho de
autor/a es de los/as Autores/as.

ABSTRACT

Saline wetlands are permanently or frequently flooded environments, exhibiting halohydromorphic soils and halophytic vegetation. The objective was to study the salinization/desalination processes of soils and the overall dynamics of water and salts in the soils of a saline wetland called "Bajo Las Saladas", located in the central west area of San Luis province (Argentina). Forty-seven phreatimeters were located to determine the depth to the phreatic water-table and its composition. Soils around the wetland were classified as Entic Haplustoll, while soils in the wetland were mostly classified as Typic Epiacuent and, to a lesser extent, as Typic Ustortent. These saline-alkaline soils present different depths of horizons and in some cases, gley horizons, and they correspond to different physiognomic types. Variations in water-table depth respond to each physiognomic type and topographic position. The average water-table depth values were 0.90 m for halophilic bush patches, 0.59 m for creeping halophilic bush patches, 0.44 and 0.41 m for open and

dense halophilic meadows, respectively, and 0.22 m for saline beach. Sulphates and sodium predominate in groundwater. In the surface efflorescences, sodium sulphate is present in its two crystallographic variants: Thenardite and Mirabilite. Modelling shows that two types of water movements predominate in the saline wetland: vertical, especially capillary rise from the groundwater, and horizontal, dominated by surface runoff. The conceptualization of salt movement shows that with warm and dry winds, salt deflagration occurs, with salts being deposited in other areas of the wetland.

Keywords: conceptual models, salt flows, water table, saline efflorescence.

INTRODUCCIÓN

Los humedales están definidos por un ambiente geomorfológico particular y por condiciones litológicas y edáficas características, y su ubicación garantiza la presencia constante o temporal de agua en superficie o subterránea (Kandus y Minotti, 2019). En particular, Davidson (2014) y Davidson et al. (2018) estimaron que alrededor del 46% de esos humedales corresponde a áreas con inundaciones estacionales. Los diferentes humedales están definidos por la interacción del agua, el suelo y la vegetación. En otra escala, la geomorfología y el clima de cada sitio resultan en distinta composición y estructura de la vegetación (Mitsch y Gosselink, 2007; Rincón-Pérez et al., 2020).

En Argentina, los humedales cubren una gran superficie del territorio nacional, y en la región pampeana se presentan como lagunas permanentes o temporales de drenaje endorreico, generalmente conectadas con las aguas subterráneas (Imbellone et al., 2021). La provincia de San Luis, ubicada en la provincia fitogeográfica del Espinal, presenta también estos tipos de paisajes.

Los suelos de los humedales salinos, como los de este estudio, poseen complejos gradientes espaciales, al existir zonas con mayor concentración y acumulación de sales en los periodos secos, mientras que, en los meses lluviosos, incluyendo inundaciones prolongadas o temporales, se diluyen las sales (Álvarez-Rogel et al., 2000; Crase et al., 2013). Los ambientes generados en estos suelos, afectados por hidro y halomorfismo, soportan una vegetación adaptada, que se distribuye usualmente en franjas y/o "parches", mientras que no presentan vegetación las zonas con mayor salinidad o mayor encharcamiento y anoxia o playas salinas (Moffett et al., 2010; Barbosa et al., 2023; Gouveia et al., 2023).

La profundidad de la capa freática es un factor importante en la determinación de patrones de salinización y determina la aparición de ambientes particulares donde se van a instalar plantas especialmente adaptadas o que se ven favorecidas competitivamente (Álvarez-Rogel, 1999). Asimismo, el movimiento de las sales dentro del perfil del suelo y su acumulación en la superficie están asociados con la concentración salina del nivel freático. La relación entre profundidad y concentración salina del nivel freático y la salinización de los suelos es conocida desde los albores de la ciencia del suelo y está tipificada desde hace muchos años (Richards, 1974; Peck, 1978; Kovda y Szabolcs, 1979). Para la caracterización del agua freática se utiliza el diagrama de Piper. Este procedimiento gráfico es una herramienta efectiva en la segregación analítica de datos, para el estudio de los constituyentes disueltos en aguas, los cambios en la composición de un agua por el pasaje a través de un área y problemas geoquímicos relacionados (Donado-Garzón, 1999).

El movimiento de las sales dentro del perfil del suelo desde el nivel freático y su acumulación en la superficie es causado por difusión, convección o ambos procesos simultánea o sucesivamente (Imbellone et al., 2021). Cuando el agua freática se encuentra frecuentemente cerca del suelo superficial y es altamente salina (Dangavs, 2005), las sales ascienden por difusión y cuando el suelo se seca, finalmente llegan a la superficie del suelo, esta vez por flujo másico. Las sales, principalmente sódicas, finalmente forman eflorescencias salinas de diferente espesor cuando el suelo se seca, ya sea en el perfil del suelo o en la superficie del mismo (Imbellone et al., 2021). También se reconoció desde hace muchos años la importancia del ingreso de sales a los suelos, a través de la deposición atmosférica (por ej. Ballantyne, 1978; Kovda y Szabolcs, 1979; Pye, 1987; Zhurbas y Vali, 2022).

Cuando se estudian fenómenos o sistemas complejos, como el movimiento de sales en ambientes de humedales salinos, los modelos conceptuales son muy útiles ya que representan el objeto de estudio de una forma más simple, centrándose en los aspectos más destacados del fenómeno (Mondino, 2014). Los modelos conceptuales, son modelos diseñados para facilitar la comprensión de estos sistemas físicos o fenómenos naturales (Moreira et al., 2002; Moreira et al., 2011). Estos modelos conceptuales han sido utilizados para diversos fines, como, por ejemplo: modelización de la humedad del suelo y de la capa freá-

tica (Degioanni et al., 2006; Diaz, 2015), evolución del paisaje y salinización de tierras (Bless et al., 2018), modelización de la salinización superficial (Simon et al., 2011), entre otros. Cisneros et al. (1999) presentó la modelización de dos tipos dinámicos funcionales en suelos salinos sódicos influenciados por el nivel freático para áreas del sur de Córdoba. Un tipo dinámico para suelo desnudo, con flujo vertical ascendente (ascenso capilar, evaporación); y otro tipo dinámico para suelo con vegetación, donde predominan el flujo vertical descendente (infiltración, percolación).

Dados los escasos estudios acerca de los humedales salinos del centro del país, nuestro objetivo fue estudiar los procesos de salinización/desalinización de los suelos de un humedal salino de la provincia de San Luis. Para ello se determinaron los movimientos del agua superficial y subsuperficial, y de las sales, y se desarrollaron modelos conceptuales para los movimientos del agua y las sales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área, suelos y vegetación

El trabajo se llevó a cabo a 7 km al norte de la ciudad de Villa Mercedes (San Luis) en la depresión "Bajo Las Saladas" (33° 37' S y 65° 25' W) con una superficie aproximada de 87,2 ha. El clima es semiárido y presenta dos estaciones marcadas: un semestre seco y frío en otoño-invierno y un semestre cálido, primavera-verano, el que concentra la mayor parte de las lluvias (Barbosa, 2020). Los suelos se originaron a partir de sedimentos loessoides y eólicos arenosos y son predominantemente de textura gruesa (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Gobierno de la provincia de San Luis, 2000; Costa et al., 2005).

El humedal salino estudiado comprende dos de los paisajes de la región (Barbosa, 2020). El primero de ellos, el manto arenoso casi plano (con un subpaisaje denominado sector llano), presenta una topografía suavemente ondulada con pendientes menores que el 1 %. Los suelos, en este caso, son Haplustoles énticos y la vegetación, en el área de estudio, se destaca por el dominio de *Neltuma caldenia* y *Geoffroea decorticans*, determinando el monte halófilo. El sector llano es el único que presenta suelos de características zonales.

El segundo paisaje es la depresión donde predominan suelos salinos-alcalinos y está integrada por los subpaisajes denominados i) sector alto, ii) sector bajo con salinidad en superficie, y iii) cauces y lagunas temporarias. En el primer subpaisaje, los suelos son Ustortentes típicos, y la vegetación es dominada por *Atriplex spp.* correspondiendo al matorral halófilo. Continúa un sector bajo con salinidad en superficie, en donde se presentan varios tipos fisonómicos de vegetación: los parches de arbustal halófilo rastrero (dominado por *Sarcocornia neei*), y las praderas halófilas abiertas y densas (dominadas por *Distichlis spicata*). El último sector corresponde al fondo de la depresión, en donde se ubica la playa salina, que es inundable, con suelo desnudo y sales en superficie en periodos secos. En estos dos últimos sectores, sin embargo, los suelos predominantes son clasificados como Epiacuentes típicos (Barbosa, 2020). Aunque los suelos presentan algunas propiedades químicas con algunas diferencias, se observa que la ubicación taxonómica de estos suelos no acompaña a los diferentes tipos fisonómicos de vegetación en la depresión.

En la Tabla 1 se presenta una síntesis de la composición y propiedades de los suelos, extraídos de Barbosa et al. (2022).

Tabla 1. Características del suelo en los diferentes sub-paisajes, clasificación de los suelos, tipos fisonómicos, distribución de horizontes y textura. Valores extremos máximos y mínimos de carbono orgánico (CO) y nitrógeno total (Nt) ($g\ kg^{-1}$); pH (1:2.5); conductividad eléctrica (CE, $dS\ m^{-1}$); profundidad de la freática (cm) y potencial redox (Eh, mV) todos del horizonte A (adaptado de Barbosa et al., 2022).

Table 1. Soil characteristics in the different sub-landscapes, soil classification, physiognomic types, distribution of horizons and texture. Extreme values of organic carbon (CO) and total nitrogen (Nt) ($g\ kg^{-1}$); pH (1:2.5), Electrical Conductivity (CE, $dS\ m^{-1}$); Phreatic depth (cm) and redox potential (Eh, mV) in the A horizon (adapted from Barbosa et al., 2022).

| Sub-paisajes | Suelos | Tipos fisonómicos | Horizontes/textura | CO/Nt* | pH/CE* | Profundidad freática/Eh ** |
|---|------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|----------------------------|
| Sector llano | Entic Halustoll | Monte halófito | A-AC-C | 11,7-13,5 | 6,2-6,7 | ≥ 155 |
| | | | Fa | 0,7-0,8 | 0,4-3,4 | 402-449 |
| Sector alto | Typic Ustortent | Matorral halófito | A-AC-C | 7,3-10,0 | 8,1-8,4 | 50-141 |
| | | | Fa | 0,83 | 5,6-9,5 | 378-419 |
| Sector bajo con salinidad en superficie | Typic Epia-cuent | Parches de arbustal halófito rastrero | A-AC-C | 4,7-11,7 | 8,6-9,6 | 3-80 |
| | | | Fa | 0,4-0,5 | 16,8-24,4 | 402-449 |
| | | Pradera halófito abierta | Ag-A-AC-C | 6,5-8,5 | 9,1-9,8 | 15-84 |
| | | | Fa/F | 0,6-0,7 | 14,4-26,3 | 330-388 |
| | | Pradera halófito densa | Ag-A-AC-C | 7,3-13,4 | 8,5-9,1 | 12-82 |
| | | | F | 1,0-1,1 | 17,2-22,8 | 313-419 |
| Cauce y lagunas temporarias | | Playa salina | Ag-A-AC-C | 9,1-11,5 | 8,6-9,2 | +7-75 |
| | | | Fl | 0,6-0,8 | 13,6-30,3 | 103-384 |

Textura: Fa: franca arenosa; F: franca; Fl: franca limosa

* Variabilidad espacial.

** Variabilidad espacial y temporal.

Determinaciones

La hidrología de la depresión, los flujos de agua superficiales y las zonas encharcadas, fueron examinados con ayuda de planos planialtimétricos previos. También, para el seguimiento de la profundidad del nivel freático se instalaron 38 freatímetros en los mismos lugares de la depresión salina en los que se hicieron observaciones de los perfiles de suelos (Barbosa et al., 2022), a los que se sumaron 9 freatímetros adicionales. Todos ellos se ubicaron en cada uno de los sectores del paisaje de la depresión salina, de tal manera que se encontraban distribuidos uniformemente sobre el paisaje, para incrementar el nivel de precisión.

En cada uno de ellos, se determinó la profundidad al nivel freático en forma mensual desde mayo 2015 hasta octubre 2024. Los freatímetros consistieron en tubos de PVC insertados en el suelo en orificios realizados con barreno hasta la profundidad de la capa de material endurecido (calcreto o tosca) impermeable. Se registró la profundidad a la que se encontraba esta capa, en cada caso. Los tubos fueron agujereados en los 20 cm inferiores, de manera que el agua freática pueda fluir libremente a través suyo. En caso de permanecer el suelo inundado se midió el nivel sobre la superficie de este.

El mapa de elevaciones de terreno, se realizó a partir de los datos de las coordenadas planialtimétricas de alrededor de 3000 puntos del terreno medidos con la estación total Pentax R-205NE y los prismas circulares GPR111, a través de la función "Create TIN", que utiliza los puntos de muestra para crear una superficie formada por triángulos basada en información de los puntos vecinos más cercanos ("Triangulated Irregular Network"). Posteriormente se generó el mapa de isohipsas del terreno, o curvas de nivel, a través de la función "Contour". Del mismo modo se procedió para generar el mapa de elevación de la capa impermeable,

a partir de los datos de las coordenadas planialtimétricas de los 47 pozos freáticos, y a través de la función "Create TIN". Luego, se generó el mapa de isohipsas de la capa impermeable, a través de la función "Contour".

Los mapas de altimetría de la freática se generaron a partir de los datos de las mediciones de la profundidad a la freática, a través de la función de interpolación IDW (Distancia Inversa Ponderada). Todas estas herramientas se incluyen dentro de Spatial Analyst del software ArcGis 10.1.

Con los mapas obtenidos se establecieron los patrones de movimiento del agua en superficie y del nivel freático del humedal, comparando los mapas generados con el fin de relacionar las variables altura del terreno y profundidad del nivel freático.

Por otro lado, con el objeto de caracterizar el agua en cada uno de los sectores del área, se tomaron muestras del agua freática con una sonda, en forma bimensual (desde mayo 2015 a mayo 2016) y luego trimestralmente (agosto 2016 a marzo 2019). Las muestras se guardaron en frascos de cierre hermético para su análisis en laboratorio, los parámetros determinados en las aguas fueron:

- pH. Se determinó mediante el método potenciométrico [Instituto Argentino de Normalización y Certificación - Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca (IRAM-SAGyP), 2021] directamente en la muestra de agua. Se utilizó un pH-metro (OAKTON Ion 6 Acorn Series) previamente calibrado.
- Residuo seco (RS) se determinó con una muestra secada durante 48 horas a 105 C.
- Conductividad eléctrica (CE). Se determinó con un conductímetro (Antares III de PARSEC) previamente calibrado, y las unidades se expresaron en dS m^{-1} .
- Aniones. Carbonatos y bicarbonatos se determinaron por titulación con ácido (Soil Survey Laboratory, 2004), mientras los cloruros por volumetría de precipitación (Soil Survey Laboratory, 2004) y los sulfatos por Turbidimetría (Soil Survey Laboratory, 2004). Las unidades se expresaron en mol m^{-3} .
- Cationes. Calcio y magnesio se determinaron por complejometría con EDTA (Soil Survey Laboratory, 2004), mientras que sodio y potasio con un fotómetro de llama Metrolab 315 (Soil Survey Laboratory, 2004). Las unidades se expresaron en mol m^{-3} .
- Relación de absorción de sodio (RAS). Se calculó por aplicación de la fórmula:

$$\text{RAS} = \text{Na}^+ / \sqrt{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}} / 2$$

El agua freática fue caracterizada mediante el diagrama de Piper. Su obtención y la de los gráficos de relaciones entre cationes y aniones de las aguas freáticas fue realizada a través del software libre Diagrammes versión 8.6 (2024).

También fueron extraídas muestras de los cristales de sales precipitados superficialmente en el humedal, y fueron determinados por microscopía petrográfica en el departamento de Geología de la UNRC.

Análisis estadístico

Con los datos mensuales de la freática de cada tipo fisonómico se realizó un análisis ANOVA de medidas repetidas y posterior test de Bonferroni ($p \leq 0,05$). Este test fue utilizado ya que el número de observaciones en cada nivel no fue el mismo, pues hubo freáticos que no registraron agua en las épocas secas. Adicionalmente se realizó una correlación de los datos de los niveles freáticos con las precipitaciones del sector y fue utilizado el módulo de correlaciones de parámetros determinados en el agua en el software Diagrammes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos del ANOVA de medidas repetitivas ($p < 0,05$) de la profundidad a la freática presentaron diferencias significativas en todos los años de medición, entre los distintos sectores del paisaje. El test de Bonferroni ($p < 0,05$) presentó diferencias significativas para la profundidad del nivel freático para los suelos de los tipos fisonómicos registrados. En la Figura 1 se observan claramente las diferentes alturas y las variaciones de la capa freática, en periodos lluviosos o secos, y responde a su posición topográfica. Los valores promedio para los diferentes tipos fisonómicos son: el matorral halófilo con un valor de 0,90 m, en el extremo superior, mientras que en el extremo inferior están los parches de arbustal halófilo rastrero con 0,59 m; las praderas halófilas abierta y densa con valores de 0,44 y 0,41 m respectivamente; y la playa salina con 0,22 m. En la misma figura puede observarse, también, que en las épocas lluviosas la diferencia en la profundidad freática entre los diferentes tipos fisonómicos fue menor, y aumentó en las épocas de sequía.

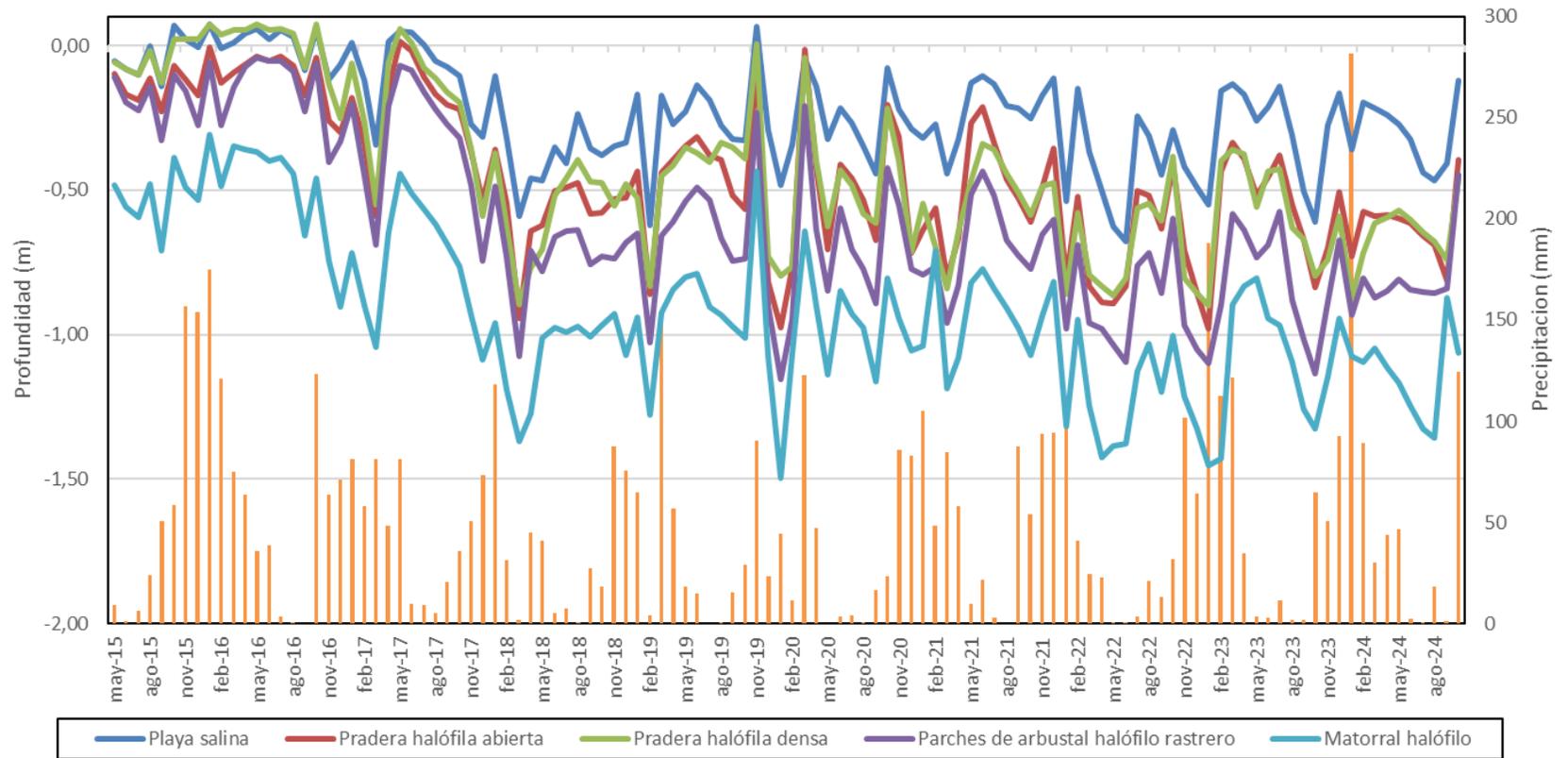


Figura 1. Profundidad del nivel freático (m) de los tipos fisonómicos estudiados y precipitación (mm) del sector.

Figure 1. Water-table depth (m) of the studied physiognomic types and precipitation (mm) of the area.

En esta figura también se puede observar que, a partir de 2015, año de ocurrencia del fenómeno ENOS (El Niño Oscilación Sur), las precipitaciones disminuyeron. Esto se refleja en los promedios anuales (1205 mm para 2015, 771 mm para 2016, 553 mm para 2017, 458 mm para 2018, 469 mm para 2019, 441 mm para 2020, 660 mm para 2021, 436 mm para 2022, 686 mm para 2023, y 637 mm hasta octubre 2024). Esta disminución de las precipitaciones provocó una mayor profundidad de la freática. Asimismo, no existió vinculación entre las precipitaciones y el nivel freático durante el periodo estudiado.

Los movimientos del agua superficial en la depresión salina ocurren primero en forma laminar (suelos salino-sódicos) y luego se encausan a través de varios cursos de agua que descienden al canal de desagüe colmatado “Bajo Las Saladas” (Figura 2).

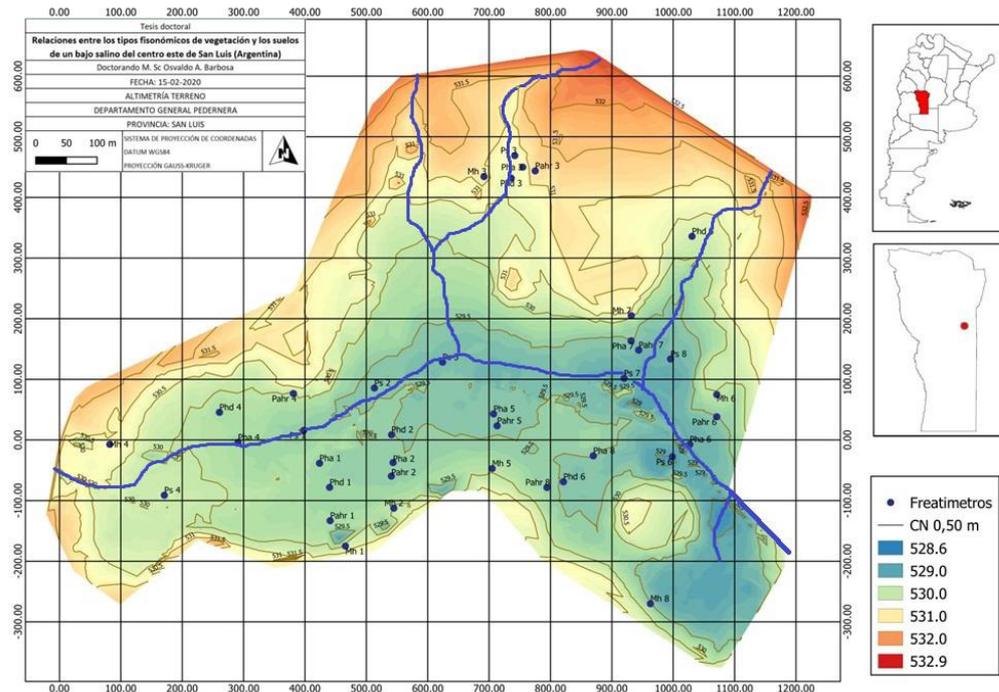


Figura 2. Mapa altimétrico que muestra el movimiento superficial del agua a través de las líneas de menor cota (en azul).
Figure 2. Altimetric map showing the surface movement of water through the lines of low resistance (in blue).

En la Figura 3 se puede observar los mapas del nivel freático realizados, para uno de los periodos de mayor precipitación (diciembre 2015 a marzo 2016), mostrando claramente como drena la freática siguiendo aproximadamente el canal excavado en el “Bajo Las Saladas” con dirección Este-Sudeste.

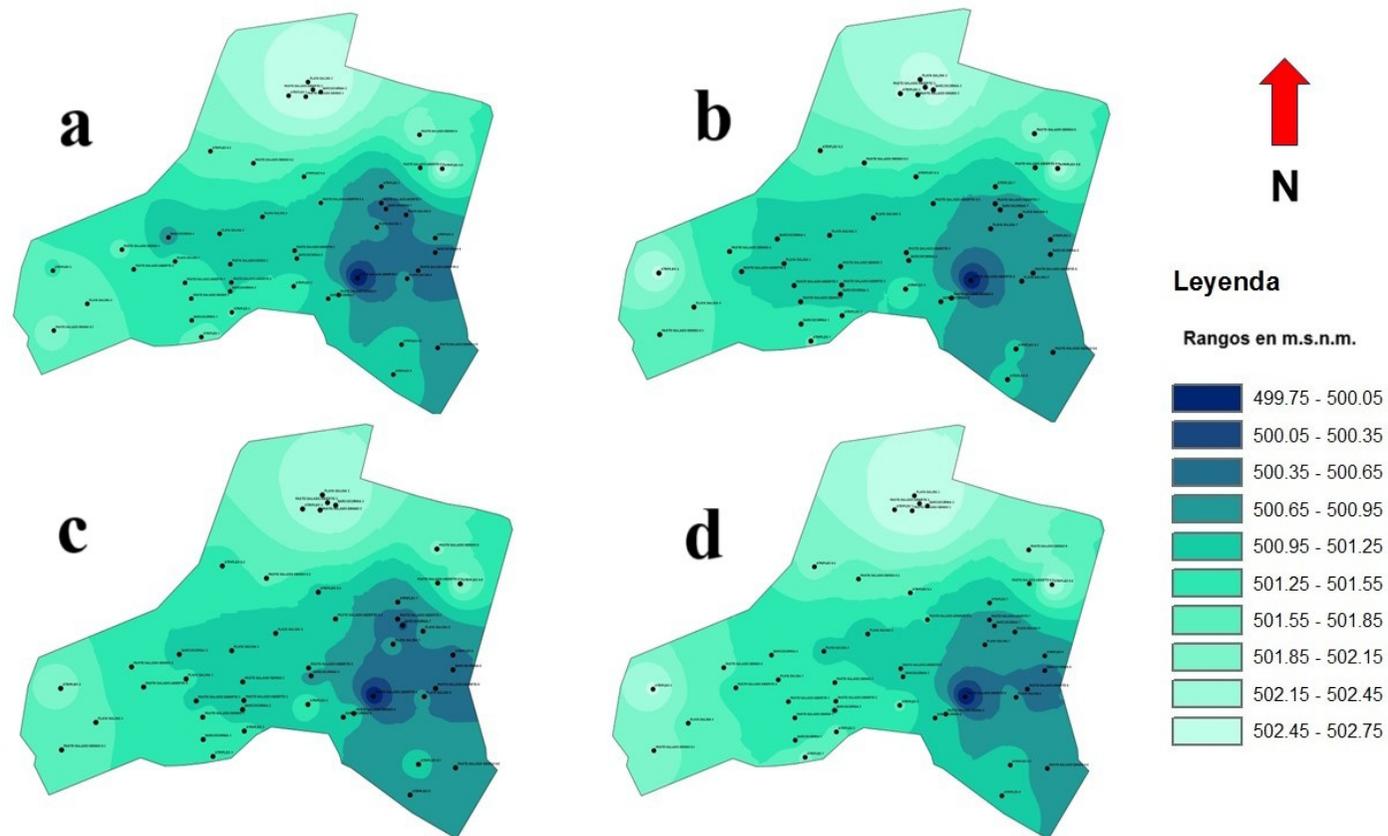


Figura 3. Mapas de la freática a) diciembre 2015, b) enero 2016, c) febrero 2016 y d) marzo 2016.
Figure 3. Phreatic maps in a) December 2015, b) January 2016, c) February 2016 and d) March 2016.

En la Tabla 2 se presentan los parámetros químicos determinados en el agua freática (periodo mayo 2015 a marzo 2019).

Tabla 2. Parámetros determinados en la freática: pH, residuo seco (RS, g L⁻¹), Conductividad eléctrica (CE, dS m⁻¹), CO₃⁼+CO₃H⁻ (mol m⁻³), Cl⁻ (mol m⁻³), SO₄²⁻ (mol m⁻³), Ca²⁺ (mol m⁻³), Mg²⁺ (mol m⁻³), Na⁺ (mol m⁻³), K⁺ (mol m⁻³) y relación de absorción de sodio (RAS). Valor promedio ± desviación estándar y valor máximo y mínimo para el periodo considerado.

Table 2. Parameters determined in groundwater: pH, dry residue (RS, g L⁻¹), electrical conductivity (CE, dS m⁻¹), CO₃⁼+CO₃H⁻ (mol m⁻³), Cl⁻ (mol m⁻³), SO₄⁼ (mol m⁻³), Ca²⁺ (mol m⁻³), Mg²⁺ (mol m⁻³), Na⁺ (mol m⁻³), K⁺ (mol m⁻³) and sodium absorption ratio (RAS). Average value ± standard deviation and maximum and minimum values for the period considered.

| Tipo fisonómico | Suelos | pH | RS | CE | CO ₃ ⁼ + CO ₃ H ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁼ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | RAS |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|-----------------|------------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------|
| Playa Salina | | 8,3±0,3 | 34,0±14,5 | 30,5±10,6 | 15,2±5,2 | 144,5±56,6 | 359,2±169,1 | 45,6±15,5 | 63,7±38,1 | 406,2±175,7 | 4,0±1,5 | 53,4±15,6 |
| | | 7,79-8,81 | 14,5-60,3 | 15,0-48,7 | 7,2-27,7 | 76,7-289,9 | 112,8-680,7 | 81,7-22,3 | 137,4-20,3 | 166,6-720,3 | 1,8-8,5 | 25,1-70,9 |
| Pradera halófila abierta | | 8,2±0,3 | 26,0±13,2 | 24,7±10,5 | 16,0±7,7 | 119,8±51,8 | 265,5±148,7 | 40,4±18,6 | 53,0±30,7 | 302,5±165,2 | 3,3±1,8 | 41,3±17,8 |
| Pradera halófila densa | Typic | 7,4-8,6 | 3,9-49,2 | 5,9-45,3 | 5,3-25,6 | 7,38-8,57 | 25,8-540,9 | 83,0-18,4 | 116,8-10,8 | 24,5-599,1 | 0,7-7,5 | 5,2-65,9 |
| | Epiacuent | 8,3±0,4 | 23,2±11,4 | 22,7±10,0 | 13,5±6,7 | 108,5±49,8 | 236,2±126,1 | 35,8±12,2 | 45,1±27,4 | 272,7±141,8 | 2,8±1,4 | 39,7±15,2 |
| Parches de arbustal halófilo rastrero | | 7,5-8,8 | 6,7-49,4 | 8,1-44,0 | 6,7-27,3 | 41,2-206,5 | 51,1-549,6 | 53,0-16,9 | 118,8-16,6 | 61,9-581,6 | 0,7-5,2 | 12,4-61,2 |
| | | 8,2±0,3 | 36,7±17,2 | 33,3±13,7 | 18,6±9,5 | 167,0±86,7 | 379,5±186,7 | 46,7±19,7 | 76,9±42,7 | 434,9±226,8 | 4,7±2,7 | 53,3±23,0 |
| Matorral halófilo | | 7,6-9,1 | 9,7-72,9 | 12,9-62,2 | 6,8-49,7 | 64,3-442,5 | 66,5-775,1 | 24,3-89,6 | 28,0-144,2 | 48,9-900,6 | 1,3-11,0 | 6,8-100,0 |
| | Typic | 8,2±0,4 | 23,0±13,0 | 23,8±11,0 | 17,4±9,1 | 109,4±58,5 | 230,5±140,4 | 33,6±17,0 | 48,5±29,8 | 268,3±163,0 | 3,7±2,2 | 37,4±19,5 |
| | Ustortent | 7,5-9,0 | 1,7-47,4 | 4,2-46,4 | 6,1-39,9 | 13,1-254,1 | 10,2-540,0 | 7,0-78,0 | 4,6-117,1 | 15,0-587,1 | 0,2-8,1 | 3,9-77,8 |

En la Tabla 2, el pH del agua no presenta diferencias estadísticas en todos los sectores de la depresión durante el periodo considerado; esta uniformidad también se refleja en los valores de la desviación estándar. A lo largo del periodo estudiado los valores de pH aumentaron en unas décimas a partir de sus valores iniciales, entre 1,5% y 8,3% según los sitios. Contrariamente, los valores de residuo seco (RS) y de conductividad eléctrica (CE), presentan un patrón distinto. Ambas determinaciones están relacionadas y sus valores son semejantes; la desviación estándar fue mayor que en los valores de pH. Los valores más elevados se encontraron en los suelos de parches de arbustal halófilo rastrero, seguido de los de la playa salina, pradera halófila abierta, luego pradera halófila densa y matorral halófilo. La Figura 4 muestra que los valores de CE presentaron aumentos en invierno-primavera y disminución en verano-otoño (por mayores precipitaciones), pero con un marcado descenso de sus niveles iniciales desde mayo 2015 a marzo 2019. La disminución de la CE fue, en promedio, del 43 %, con valores más elevados en los suelos de las praderas halófilas y menores en la playa salina. Los valores de RS también disminuyeron en forma similar a la CE, aunque hubo mayores diferencias entre sectores.

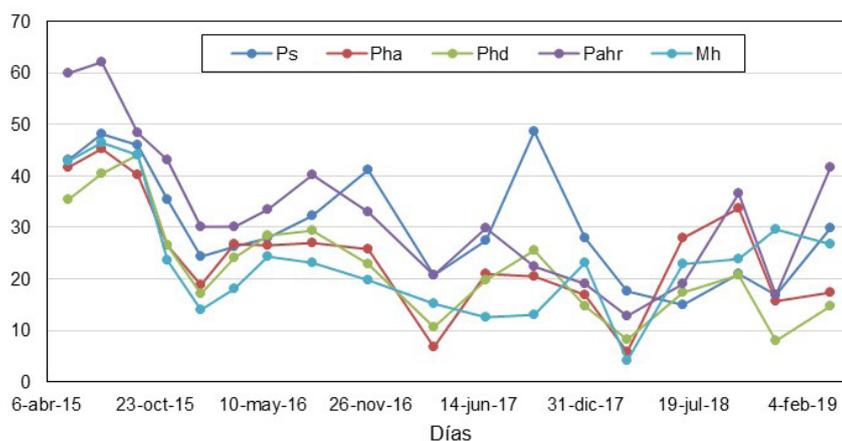


Figura 4. Promedios de la conductividad eléctrica (CE) para los suelos de diferentes tipos fisonómicos y el periodo considerado. Ps: playa salina, Pha: pradera halófila abierta, Phd: pradera halófila densa, Pahr: parches de arbustal halófilo rastrero, y Mh: matorral halófilo.

Figure 4. Average electrical conductivity (CE) for the soils of the different physiognomic types and sampling dates. Ps: saline beach, Pha: open halophilic meadows, Phd: dense halophilic meadows, Pahr: patches of creeping halophilic scrub, and Mh: halophilic scrub.

La suma de carbonatos y bicarbonatos presenta valores promedios muy semejantes en los suelos de todos los tipos fisonómicos encontrados, siendo alta también su variabilidad. La concentración de los cloruros y sulfatos, por el contrario, mostró un patrón de distribución semejante al del RS y la CE, siendo también alta su variabilidad. Todos los cationes presentaron el mismo patrón de distribución semejante al del RS y la CE, siendo el sodio el catión predominante en todos los casos, seguido por el magnesio, el calcio y finalmente el potasio.

Tomando en cuenta los promedios de los aniones en las aguas freáticas, se puede advertir que las aguas freáticas poseen alrededor del 30% de cloruros, 4% de carbonatos y bicarbonatos, y 66% de sulfatos, con variaciones según los sectores. La concentración de los aniones disminuyó en los suelos de diferentes sectores del paisaje, en todos los casos. Los cloruros descendieron del 76 % hasta el 49 %, los carbonatos y bicarbonatos disminuyeron entre el 55 % y el 18%, mientras que los sulfatos disminuyeron sus valores entre el 67 % y el 34 %, según los suelos de los distintos sectores. La playa salina fue la excepción, por presentar ligeros aumentos en la concentración, lo que podría deberse a que presenta la cota más baja, acumulando sales, antes de que estas se retiren por el canal de desagüe.

El contenido de cationes de las aguas freáticas en promedio fue de 10% de calcio, 13% magnesio, 77% sodio y 1% de potasio, variando en los diferentes sectores. Los cationes, en forma general disminuyeron sus concentraciones. El calcio, es el que menos disminuyó, con la excepción de la playa salina que aumentó un 64,8%. El magnesio, el sodio y el potasio disminuyeron en toda el área, variando su concentración según los sectores. La RAS también disminuyó, excepto la playa salina donde aumentó un 3,7%.

Los diagramas de Piper (Figura 5) de todos los análisis de agua freática realizados a través del tiempo, muestran que poseen, principalmente, características sulfato-sódicas. Para la región sur de Córdoba (en zona subhúmeda), Cisneros et al. (1999) encontraron el predominio de cloruros sobre sulfatos (56 a 41 % respectivamente), para la freática regional.

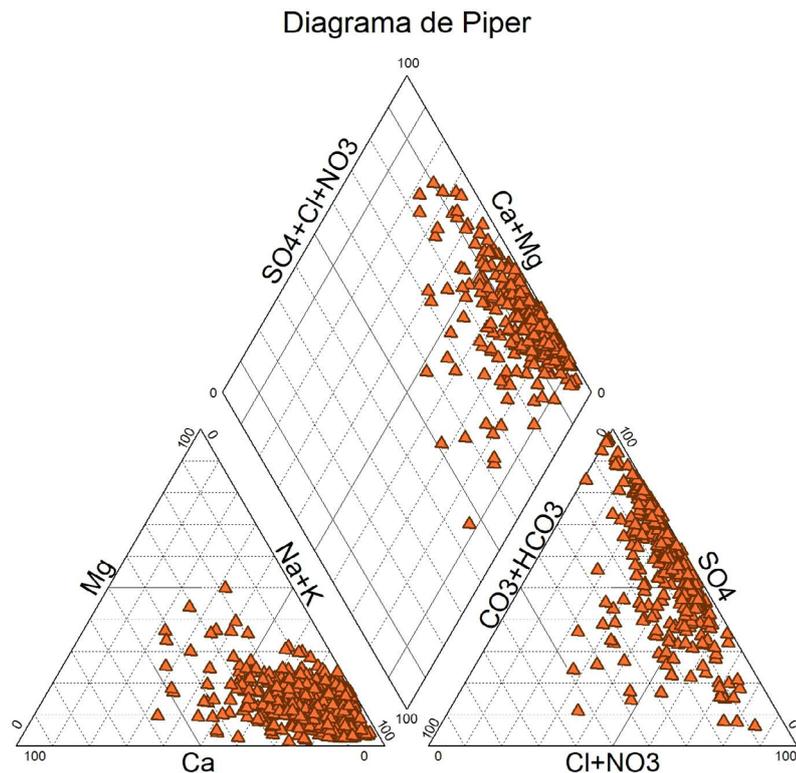


Figura 5. Diagrama de Piper de las aguas freáticas en el periodo estudiado.

Figure 5. Piper diagram of groundwater in the period under study.

Asimismo, fue encontrada una estrecha relación de los sulfatos con el sodio, cuya ecuación fue:
 $SO_4 = 0,9025 Na - 11,6395$ ($R^2 = 0,95$).

En la Figura 6 se presenta el modelo conceptual de los movimientos del agua superficial y subsuperficial en los distintos sectores del paisaje, indicando los tipos fisonómicos y los suelos correspondientes. En el sector plano, las precipitaciones en exceso percolan hacia el nivel freático, y si bien existe ascenso capilar, este no sería importante debido a la profundidad de la capa freática y, a lo profundo de los sistemas radicales. Las pérdidas más importantes de agua ocurren por evapotranspiración de la gran biomasa del monte halófilo manteniendo las sales lejos de la superficie. Sería un proceso semejante al que encontraron Jobbagy et al. (2021), en el sentido de que el sistema radical profundo en los ecosistemas leñosos en el Chaco y Espinal, limita la profundidad del nivel freático y que este asciende cuando esta vegetación es reemplazada por cultivos anuales.

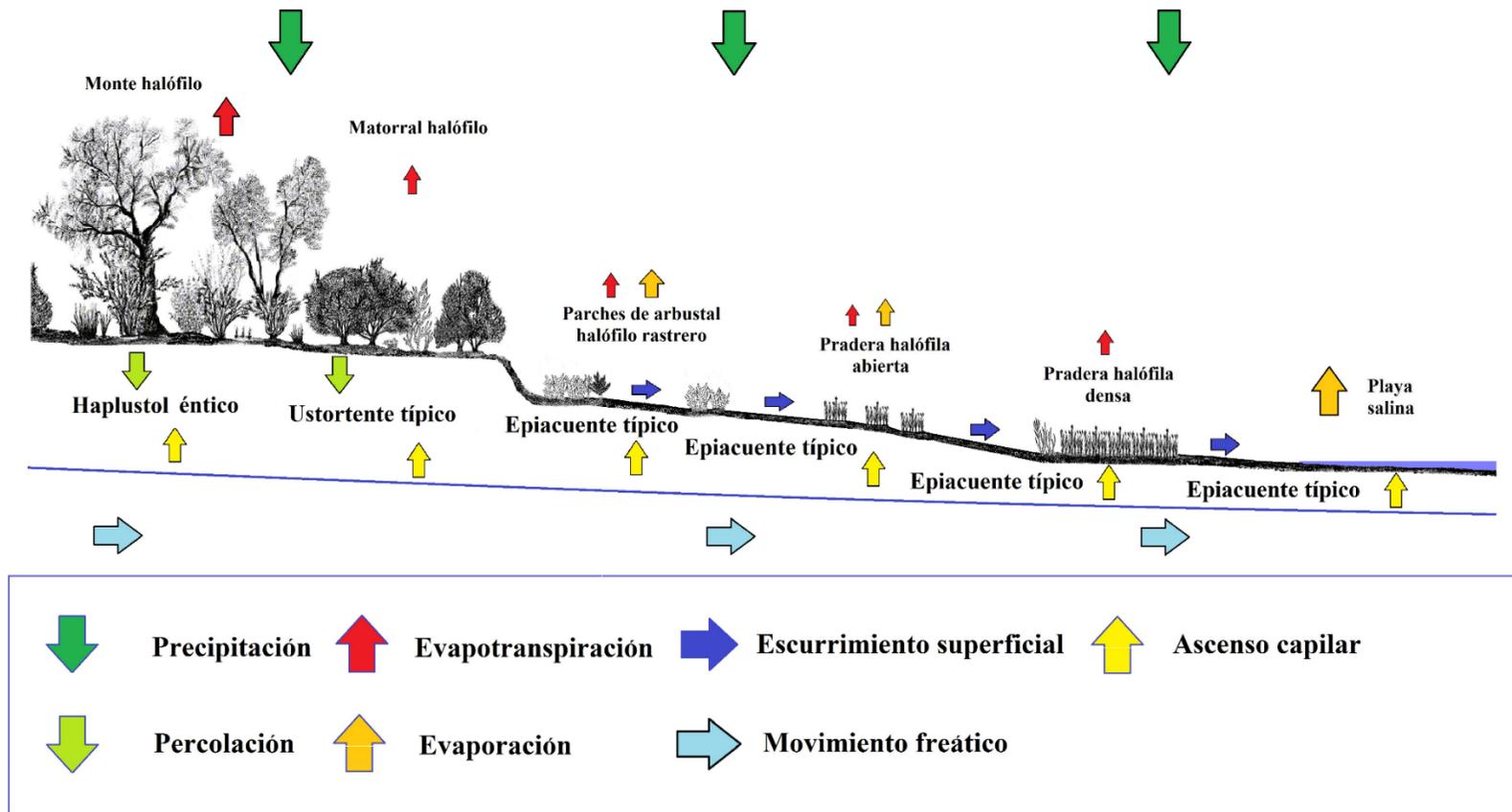


Figura 6. Modelo conceptual de la dinámica del agua superficial y subsuperficial en cada posición del relieve. Se indican los distintos tipos fisonómicos y su correspondiente suelo.
Figure 6. Conceptual model of the dynamics of surface and subsurface water in each position of the relief. The different physiognomic types and their corresponding soil types are indicated.

En el sector alto de la depresión salina, la capa freática más elevada determina un ascenso capilar que genera mayor nivel salino a menor profundidad en el suelo. Asimismo, las pérdidas por transpiración son menores por la menor biomasa de este tipo fisonómico. En épocas húmedas, especialmente cuando el sector alto termina en forma de barranca, en la base de esta aparecen afloramientos de agua freática. También es importante la cobertura de los suelos, ya que en los lugares en donde el matorral halófilo se encontraba abierto, es notable la presencia de sales en superficie (Figura 7), mostrando la envergadura de este movimiento vertical ascendente de agua.



Figura 7. Formación de cristales de sales (tenardita) en la playa salina.

Figure 7. Formation of salt crystals (thenardite) on the saline beach.

Cuando se producen las lluvias, los suelos del sector bajo sufren el sellado superficial, relacionado posiblemente con la alcalinidad presente. Este sellado provoca un escurrimiento superficial importante, debido a que causa la inundación periódica de los sectores más planos cóncavos ocupados por las playas salinas. En algunas oportunidades se forman lagunas temporales. Todos estos procesos se correlacionan perfectamente con la aparición de rasgos redoximórficos en todos estos perfiles (gley, revestimientos de poros y masas de hierro, manchas de dispersión y fuerte olor desagradable producto de procesos de sulfato-reducción) (Barbosa et al., 2022).

En síntesis, por poseer escasa pendiente, la depresión salina se caracteriza por que predominan dos tipos de movimientos de agua. El vertical, especialmente el ascenso capilar del agua freática, naturalmente salina, que de esta manera llega a la superficie en donde finalmente se evapora, y deja sobre ella eflorescencias salinas. Y el horizontal, dominado por escurrimiento superficial y el movimiento lateral de la freática, hecho que puede corroborarse con la Figura 3. Por lo tanto, estos movimientos del agua tienen especial importancia en el movimiento de las sales en estos tipos de ambientes, destacando las diferencias entre periodos secos y húmedos.

Durante las épocas secas, especialmente a la salida del invierno (agosto y septiembre) con predominio de vientos generalmente del norte, por lo tanto, secos y cálidos, en el sector bajo, donde el suelo desnudo abarca mucha superficie y la playa salina casi no presenta vegetación, el viento levanta los cristales de sales que han llegado a través de escurrimiento superficial o del ascenso capilar y precipitados en superficie por evaporación. Estas sales son trasladadas a otros tipos fisonómicos, algunas veces en forma de torbellinos blancos (Figura 8).



Figura 8. Sal movilizada por el viento en la playa salina de la zona de estudio.

Figure 8. Salt mobilized by the wind on the saline beach of the study area.

En los periodos más lluviosos, las sales son lavadas de las hojas y ramas y percolan hacia el nivel freático y en el sector bajo escurren superficialmente. En la playa salina, hacia donde escurren las sales de los sectores más elevados, cuando el agua finalmente es evaporada, la sal aparece de nuevo en superficie por evaporación para iniciar nuevamente todo el proceso (Figura 9).

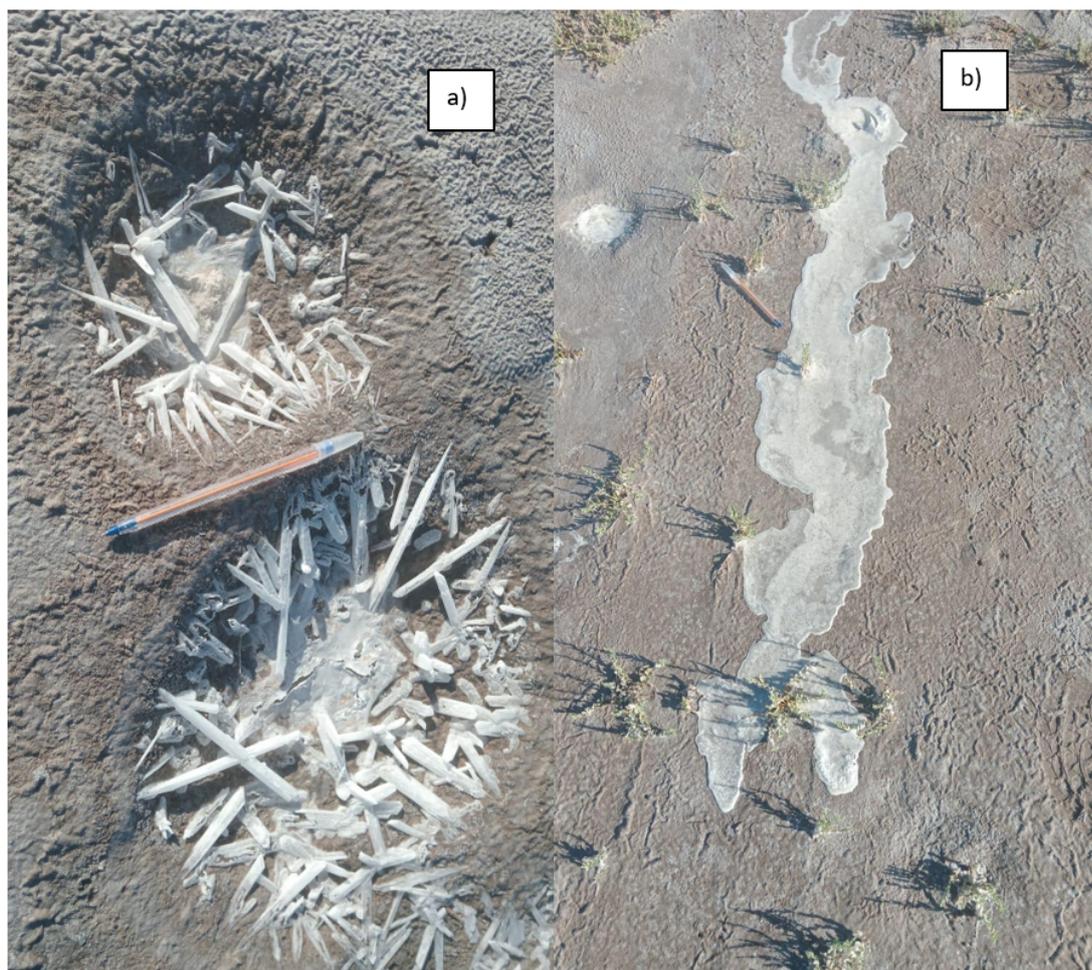


Figura 9. a) Presencia de cristales de tenardita y mirabilita (sales de SO_4Na_2), b) escurrimiento de sales en las primeras lluvias después del invierno.

Figure 9. a) Presence of thenardite and mirabilite crystals (SO_4Na_2 salts), b) runoff of salts resulting from the first rainfalls after winter.

Como se observó, el Na^+ y el SO_4^{2-} son los iones en mayor concentración en los suelos y freática y el Na_2SO_4 es la sal más frecuente. Esta sal varía su grado de hidratación en función de la humedad del suelo, originando dos especies minerales:



- 1.- Tenardita (períodos de sequía)
- 2.- Mirabilita (períodos húmedos)

La tenardita (Figura 7) y la mirabilita pertenecen al grupo de sales fácilmente solubles (solubilidad de la tenardita a $20\text{ }^\circ\text{C}$: $3,7\text{ mol kg}^{-1}$) y, por lo tanto, se movilizan en solución. Por efecto de la evaporación, esta sal es transportada a la superficie del suelo con el resto de las sales, pero la influencia de la temperatura sobre su solubilidad condiciona su presencia en superficie. Durante la época fría, especialmente si es húmeda, cuando las otras sales pueden moverse hacia la profundidad o escurrir fuera del humedal, la mirabilita permanece en superficie debido a que su insolubilidad aumenta con el descenso de temperatura. En épocas de fuerte evaporación se forma tenardita. Los cambios, en la temperatura y la humedad, entonces, pueden hacer variar la especie cristalizada, aunque se encuentran muchas veces ambas especies en el humedal.

En la playa salina fueron encontrados algunos ejemplares de "rosa del desierto" (roca evaporítica, compuesta de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de pequeño tamaño (<https://es.geologyscience.com/gemstone/desert-rose/>). La cristalización de rosas del desierto se asocia con ambientes fuertemente evaporíticos ricos en aguas sulfatadas. Esta agua se dispersa en el sedimento arenoso, se evapora y precipita yeso en numerosos cristales que se intersecan y crecen entre ellos.

Biglia et al. (2013), encontraron cristales de tenardita y mirabilita en precipitados químicos litorales de la Laguna Mar Chiquita (Córdoba) y estos se relacionaron con el flujo de agua salada del lago al nivel freático, durante la estación seca (invierno y principios de primavera).

La Figura 10 muestra una conceptualización de los movimientos de sales en el humedal salino, a través del agua y el aire. En este último caso, coincide la época seca con la mayor frecuencia de vientos, que ocurre en agosto-septiembre, combinado con una dirección norte predominante, por lo cual son cálidos y secos. En esta época, la parte superior expuesta de la playa salina se encuentra seca y el viento produce la deflagración de las sales que se depositan en otros tipos de sectores de la depresión, renovando el ciclo salinización/desalinización.

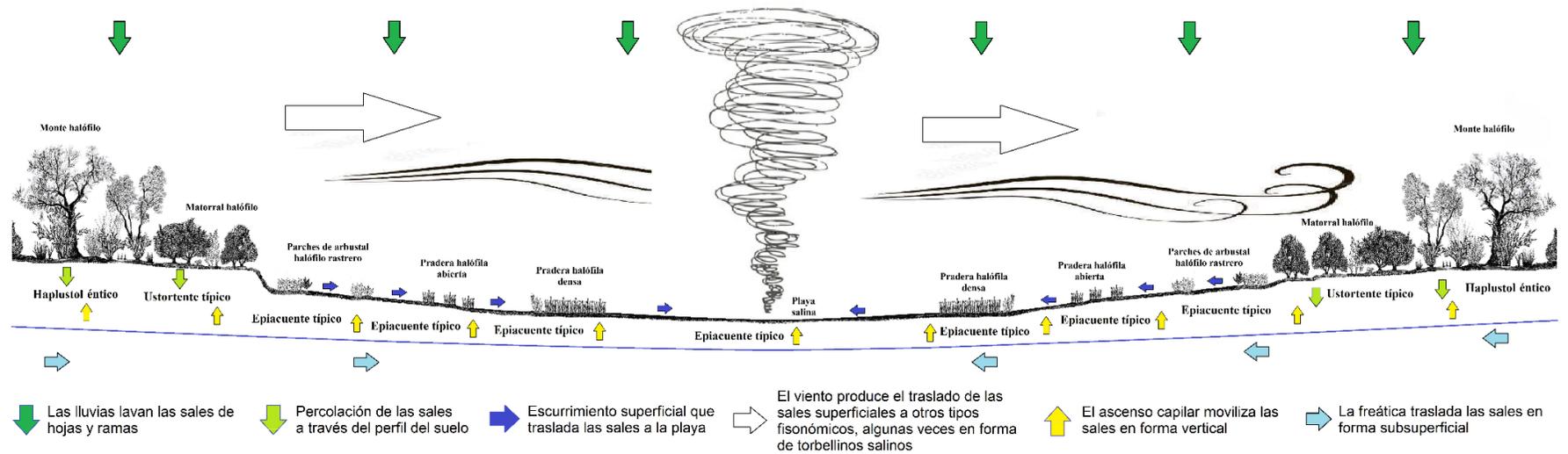


Figura 10. Modelo conceptual de la dinámica de las sales en el humedal salino estudiado. Se indican los distintos tipos fisonómicos y su correspondiente suelo.

Figure 10. Conceptual model of the dynamics of salts in the saline wetland under study. The different physiognomic types and their corresponding soil types are indicated.

En una depresión salina del NO de la provincia de Buenos Aires, Lavado y Reinaudi (1986) encontraron predominio de sulfatos en los cristales de las eflorescencias salinas y que estas eran removidas por el viento. A diferencia de otros autores que establecieron que esos cristales se trasladan grandes distancias, observaron que las sales transportadas por el viento se depositaban principalmente en las hojas de la vegetación de la propia depresión. En concordancia, la concentración de sodio en las hojas de la vegetación de 3 unidades fisiográficas, siguió el siguiente orden: praderas halófilas abiertas 27.200 mg kg⁻¹ materia seca; parches de arbustal halófilo rastrero 47.400 mg kg⁻¹ materia seca y matorral halófilo 67.600 mg kg⁻¹ materia seca (Barbosa, 2023). Si bien existen diversas especies consideradas, el orden de concentración de Na⁺ en los tejidos sigue un orden desde el centro y hacia la periferia del área y, relativamente, un patrón inverso a la salinidad del suelo. Este hecho puede acreditarse, al menos parcialmente, a deposición atmosférica de sales de la propia depresión, levantadas por el viento.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que un mismo suelo sostiene varios tipos fisonómicos, lo cual indica que, las características edáficas de los análisis y determinaciones utilizadas regularmente en la ciencia del suelo, no se vinculan en detalle con la vegetación. Por el contrario, los tipos fisonómicos presentan asociación con la profundidad al nivel freático.

El agua freática presenta flujos superficiales y subsuperficiales, que se orientan hacia un canal excavado en la década de 1960 siguiendo el desagüe natural del área. En esas aguas freáticas predominan los sulfatos como muestra el triángulo de Piper. La proporción de éstos y los restantes cationes y aniones varía en forma leve según los sectores de la depresión y a lo largo del tiempo. Las aguas se presentan como sulfato sódicas, particularmente en los cristales que se observan en la superficie de los suelos desnudos. Estos se distinguen en sus dos variables cristalográficas: Tenardita y Mirabilita.

Finalmente, los modelos conceptuales acerca del movimiento del agua y de las sales explican los procesos de salinización/desalinización que ocurren en el humedal estudiado. Particularmente se destaca el modelo referido a las sales, donde se muestra la importancia del pasaje de los cristales superficiales a la atmósfera y su posterior deposición en otros sectores de la depresión.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen los aportes efectuados por los revisores anónimos.

REFERENCIAS

- Álvarez-Rogel, J. (1999). *Relaciones suelo-vegetación en saladares del SE de España* [Tesis Doctoral]. Universidad de Murcia.
- Álvarez-Rogel, J., Alcaraz Ariza, F. y Ortiz Silla, R. (2000). Soil salinity and moisture gradients and plant zonation in Mediterranean salt marshes of Southeast Spain. *Wetlands*, 20, 357-372. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2000\)020\[0357:SSAMGA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2000)020[0357:SSAMGA]2.0.CO;2)
- Ballantyne, A.K. (1978). Saline soils in Saskatchewan due to wind deposition. *Canadian Journal of Soil Science*, 58, 105-109. <https://doi.org/10.4141/cjss78-012>
- Barbosa, O. A. (2020). *Relaciones entre los tipos fisonómicos de vegetación y los suelos de un bajo salino del centro este de San Luis (Argentina)*. [Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto].
- Barbosa, O. A., Álvarez-Rogel, J., Lavado, D. S. y Riscosa, D. A. (2022). Variaciones estacionales de salinidad y humedad y su influencia en la génesis de los suelos de un humedal salino del centro de San Luis. *Ciencia de Suelo*, 40(1), 237-256.
- Barbosa, O. A., Álvarez-Rogel, J. y Lavado, R. S. (2023). Forage offer from a saline wetland of central Argentina (San Luis Province). *Wetlands Ecology and Management*, 32, 703–712 <https://doi.org/10.1007/s11273-023-09945-0>
- Biglia, H. O., Colombo, F., Piovano, E. y Córdoba, F. (9-12 de octubre de 2013). *Tenardita y mirabilita en precipitados químicos litorales de la Laguna Mar Chiquita, Córdoba (Argentina)*. 11º Congreso de Mineralogía y Metalogenia, San Juan, San Juan, Argentina.
- Bless, A. E., Colin, F., Crabit, A., Devaux, N., Philippon, O. y Follain, S. (2018). Landscape evolution and agricultural land salinization in coastal area: A conceptual model. *Science of The Total Environment*, 625, 647-656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.083>
- Cisneros, J. M., Cantero, J. y Cantero, A. (1999). Vegetation, soil hydrophysical properties, and grazing relationships in saline-sodic soils of Central Argentina. *Canadian Journal of Soil Science*, 79, 399–409. <https://doi.org/10.4141/S98-055>
- Costa, C., Ortíz-Suárez, A., Miró, R. C., Chiesa, J., Gardini, C., Carugno, A., Ojeda, G., Guerststein, P., Tognelli, G., Morla, P. y Strasser, E. (2005). Hoja Geológica 3366-IV Villa Mercedes. Servicio Geológico Minero Argentino.
- Crase, B., Liedloff, A., Vesk, P. A., Burgman, M. y Wintle, B. A. (2013). Hydroperiod is the main driver of the spatial pattern of dominance in

- mangrove communities. *Global Ecology and Biogeograph*, 22, 806-817. <https://doi.org/10.1111/geb.12063>
- Dangavs, N. V. (2005) Los ambientes acuáticos de la provincia de Buenos Aires. En: R. de Barrio, R. O. Etcheverry, M. F. Caballé, y E. Llam-bias (Eds.), *Geología y recursos minerales de la provincia de Buenos Aires* (pp 219–236). Asociación Geológica Argentina.
- Davidson, N. (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65, 936-941. <https://doi.org/10.1071/MF14173>
- Davidson, N., Fluet-Chouinard, E. y Finlayson, C. (2018). Global extent and distribution of wetlands: Trends and issues Institute for Land, Water and Society. *Journal Marine and Freshwater Research*, 69(4), 620-627. http://dx.doi.org/10.1071/MF17019_AC
- Degioanni, A., Cisneros, J., Cantero, A. G. y Videla, H. (2006). Modelo de simulación del balance hídrico en suelos con freática poco profunda. *Ciencia del Suelo*, 24(1), 29-38.
- Diagrammes. (2024). Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon de la Université D'Avignon (Francia). Software libre. <https://terre-et-eau.univ-avignon.fr/equipements-de-terrain-et-de-laboratoire/logiciels/>
- Díaz, G. M. (2015). *Ajuste de un modelo de humedad del suelo unidimensional en localidades de Entre Ríos utilizando observaciones in situ y sensoramiento remoto*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires]. Biblioteca Digital Dr Luis Federico Leloir. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/seminario/seminario_nATM000001_Diaz.pdf
- Donado-Garzón, L. (1999). Hidrogeoquímica. En G. Pulido Silva (Ed.), *Hidrogeología con Aplicaciones y Casos de Estudio Latinoamericanos* (Chapter 3). Colombia. <https://doi.org/10.13140/2.1.4318.3684>
- Gouveia, M. M., Magni, N. N., Lopes, C. L., Ribeiro, A. S., Dias, J. M. y Silva, H. (2023). The Importance of Soil Elevation and Hydroperiods in Salt Marsh Vegetation Zonation: A Case Study of Ria de Aveiro. *Applied Science*, 13, 4605. <https://doi.org/10.3390/app13074605>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación y Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (IRAM-SAGyP). (2021). *Calidad del suelo. Determinación de pH en suelo para uso agropecuario*. Norma 29574.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Gobierno de la provincia de San Luis. (2000). Carta de suelos de la República Argentina. Hoja Villa Mercedes. INTA-Gobierno de la provincia de San Luis.
- Imbellone, P. A., Taboada, M. A., Damiano, F. y Lavado, R. S. (2021). Genesis, Properties and Management of Salt-Affected Soils in the Flooding Pampas, Argentina. En E. Taleisnik y R. S. Lavado (Eds.) *Saline and Alkaline Soils in Latin America Natural Resources, Management and Productive Alternatives*. (pp 191-208). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-52592-7>
- Jobbágy, E. G., Giménez, R., Marchesini, V., Díaz, V., Jayawickreme, D. H. y Nosetto, M. D. (2021). Salt Accumulation and Redistribution in the Dry Plains of Southern South America: Lessons from Land Use Changes. En E. Taleisnik y R. S. Lavado (Eds.) *Saline and Alkaline Soils in Latin America Natural Resources, Management and Productive Alternatives*. (pp 51-70). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52592-7_3
- Kandus, P. y Minotti, P. (2019). Conceptos y enfoques metodológicos para un inventario de humedales a escala nacional: el paisaje como organizador. Volumen Especial VII Jornadas y IV Congreso AEP: "Paisajes de cambio: la planificación posible y el consumo de suelos". *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes*, 9(1):84-89.
- Kovda, V. y Szabolcs, I. (1979). Soil salinization and alkalization processes. Modelling of soil salinization and alkalization. *Agrokemia es Talajtan*, 28:11-32.
- Lavado R. S. y Reinaudi, N. B. (1986). Wind-blown dust from salty areas as a source of fluoride for plants. *Fluoride*, 19(1):14-18.
- Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G. (2007). *Wetlands*. John Wiley and Sons.
- Moffett, K. B., Robinson, D. A. y Gorelick, S. M. (2010). Relationship of salt marsh vegetation zonation to spatial patterns in soil moisture, salinity, and topography. *Ecosystems*, 13: 1287–1302. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9385-7>
- Mondino, G. M. (2014). Modelos conceptuales y mentales, Elementos para repensar la enseñanza y aprendizaje. *Enfoques: revista de la Universidad Adventista del Plata*, 26(1):57-78.
- Moreira, F., Viedma, O., Arianoutsou, M., Curt, T., Koutsias, N., Rigolot, E., Barbati, A., Corona, P., Vaz, P., Xanthopoulos, G., Mouillot, F. y Bilgili, E. (2011). Landscape-wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. *Journal of Environmental Management*, 92, 2389-2402. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.028>
- Moreira, M. A., Greca, I. M. y Rodríguez-Palmero, M. L. (2002). Modelos mentales y modelos conceptuales en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias. *Revista Brasileira de Investigación em Educação em Ciências*, 2(3):84-96.
- Peck, A. J. (1978). Note on the role of a shallow aquifer in dryland salinity. *Australian Journal of Soil Research*, 16, 237-240. <https://doi.org/10.1071/SR9780237>
- Pye, K. (1987). *Aeolian dust and dust deposits*. Academic Press.
- Richards, L. A. (1974). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA. U.S. Government Printing Office.
- Rincón-Pérez, M., Infante-Mata, D., Moreno-Casasola, P., Hernández-Alarcón, M. E., Barbas-Macías, E. y García-Alfaro, J. R. (2020). Patrones de distribución y estructura de la vegetación en el gradiente de humedales costeros El Castaño, Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*, 68(1):242-259. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68i1.37616>
- Simon, S., Mádl-Szőnyi, J., Müller, I. y Pogácsás, G. (2011). Conceptual model for surface salinization in an overpressured and a superim-

posed gravity-flow field, Lake Kelemenszék area, Hungary. *Hydrogeology Journal*, 19(3):701-717. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0711-8>

Soil Survey Laboratory. (2004). *Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42 Version 4.0*, USDA-SCS, National Soil Survey Center.

Zhurbas, V. y Vali, G. (2022). Wind-Controlled Transport of Saltwater in the Southeastern Baltic Sea: A Model Study. *Frontiers in Marine Science, Section Coastal Ocean Processes*, 9, 835656. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.835656>