

## Planificando territorios rurales sustentables: factores causales de la salinización secundaria en las tierras secas irrigadas del norte de Mendoza

*Bárbara Guida-Johnson<sup>1,2</sup>, Romina G. Sales<sup>1,3</sup> y Leandro Mastrantonio<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA), Universidad Nacional de Cuyo, Gobierno de Mendoza, CONICET. Av. Ruiz Leal s/n (5500) Mendoza, Argentina

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Cuyo

<sup>3</sup> Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat (IRPha), Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo. Almirante Brown 500 (5528) Mendoza, Argentina  
Mail de contacto: bguidaj@mendoza-conicet.gob.ar

### RESUMEN

La producción agrícola en las tierras secas depende del riego sistematizado y ciertas prácticas no sustentables desencadenan procesos de degradación. En particular, la salinización del suelo reduce la productividad de grandes áreas irrigadas. El objetivo de este trabajo es determinar los factores causales de la salinización secundaria en el oasis norte de Mendoza. Se construyó un modelo espacialmente explícito considerando variables del soporte físico-biológico que contribuyen a la vulnerabilidad natural del paisaje y variables vinculadas a la presión antrópica, considerando como variable respuesta a la conductividad eléctrica del suelo. Se identificó a elevación, textura y cantidad de calcáreo total como las variables que más explican la variación espacial de la salinidad del suelo en dicho oasis. La identificación de estos factores permite reconocer regiones vulnerables a proteger o recuperar y diseñar medidas de restauración productiva para revertir dicho proceso, lo que contribuye a la planificación y manejo sustentable del territorio.

**Palabras claves:** modelo espacialmente explícito, restauración productiva, ordenamiento territorial.

### ABSTRACT

The agricultural production in drylands depends on systematized irrigation, and certain unsustainable practices trigger degradation processes. In particular, soil salinization reduces the productivity of large irrigated areas. The objective of this article is to determine the causal factors of secondary salinization in the northern oasis of Mendoza. A spatially explicit model was constructed considering variables of physical-biological support that contribute to the natural vulnerability of the landscape and variables linked to the anthropogenic pressure, considering the electrical conductivity of the soil as a response variable. Elevation, texture, and amount of total calcareous were identified as the variables that mostly explained the spatial variation of soil salinity in that oasis. The identification of these factors enables the recognition of vulnerable regions to protect or recover and the design of productive restoration measures to reverse this process, which contributes to the planning and sustainable management of this territory.

**Keywords:** spatially explicit model, productive restoration, land use planning.

### Introducción

Las tierras secas representan el 41% de la superficie terrestre y se caracterizan por presentar precipitaciones escasas, poco frecuentes e irregulares, suelos poco

desarrollados y baja productividad primaria, determinando que los ecosistemas sean inherentemente frágiles (Kassas, 1995; UNCCD, 2012). Considerando que el recurso hídrico es un factor limitante en estas regiones, la producción agrícola depende del

riego sistematizado, el cual transforma los ecosistemas áridos en áreas irrigadas conocidas como "oasis". Los oasis se caracterizan por cumplir un papel fundamental en la vida de la población local, presentando extensiones territoriales limitadas. En Mendoza, por ejemplo, constituyen el soporte del 98,5% de la población, pero representan solo el 4,5% de la superficie (Abraham *et al.*, 2014). A pesar de los servicios agroecosistémicos claves que proveen estas áreas, el 60% de la superficie de los oasis mendocinos presenten procesos de degradación de suelos, en mayor o menor medida (Abraham *et al.*, 2014). Así, las prácticas agrícolas no sustentables determinan una variedad de consecuencias sobre el suelo, dependiendo de las particularidades del mal manejo: pérdida de nutrientes, acumulación de sustancias tóxicas, acidificación, compactación, desecación o salinización (Abraham, 2002).

La acumulación de sales en el perfil del suelo reduce la productividad de grandes áreas irrigadas. Cuando la concentración de sales es tan alta que sobrepasa los límites de tolerancia de los cultivos, desencadena en plantas no halófitas una sintomatología relacionada con una inhibición irreversible del crecimiento (Porta Casanellas *et al.*, 2003). Entre los numerosos factores que favorecen la salinización de suelos en las zonas áridas y semi-áridas se destaca el mal manejo del recurso hídrico. En dichas regiones, cuando los volúmenes aportados al área radicular son mayores que los consumidos por las plantas, el agua que no es utilizada por los cultivos escurre sub-superficialmente. En los sectores con estratos transmisores impermeables se eleva el nivel freático y cuando el agua acumulada se evapora, deposita las sales que lleva disueltas (Abraham, 2002). Este proceso es denominado salinización secundaria para distinguirlo de la salinización primaria, la que ocurre naturalmente en zonas donde el material parental es rico en sales y la tasa de evapotranspiración es mayor que la tasa de precipitación (Zhou *et al.*, 2013). De esta

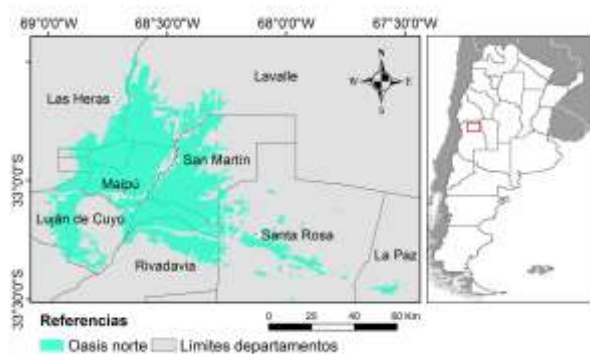
manera, el proceso de salinización secundaria del suelo responde tanto a la vulnerabilidad natural del ambiente frente a la salinización, como a la presión que es ejercida por las actividades humanas no sustentables.

Diversos estudios han analizado los factores determinantes de la salinización secundaria a partir de modelos espacialmente explícitos. Los mismos han encontrado las causas que explican el fenómeno en cada caso: la profundidad del nivel freático, la intensidad del uso de la tierra, la baja calidad del suelo, la pendiente y la salinidad del agua subterránea (Dubovyk *et al.*, 2013); la salinidad del subsuelo y el agua subterránea, el uso de la tierra, la distancia a los canales de riego y la profundidad del nivel freático (Zhou *et al.*, 2013); o determinados usos del suelo tales como la explotación petrolera, debido a que destruye directamente la cubierta vegetal, o la acuicultura salina, ya que directamente conduce a la acumulación de sal (Zhang *et al.*, 2011). Conocer los factores causales de los procesos de degradación en general, y de la salinización secundaria en particular, es fundamental para la planificación sustentable del territorio en tanto permite, o bien evitar dichos procesos por medio de la zonificación de áreas vulnerables (Sales *et al.*, 2018) o bien diseñar medidas de restauración productiva para recuperar áreas degradadas (Guida-Johnson *et al.*, 2017).

El objetivo de este trabajo es determinar los factores causales de la salinización secundaria en el oasis norte de Mendoza, a partir de la implementación de un modelo espacialmente explícito que considere características del soporte físico-biológico y del uso antrópico.

## **Materiales y Métodos**

El área de estudio es el oasis norte de Mendoza, ubicado aproximadamente entre las latitudes 32°28'20.37"S y 33°21'7.59"S y las longitudes 69°1'35.07"O y 67°31'36.93"O (Fig. 1).



**Fig. 1.** Localización del área de estudio. Fuente: elaboración propia en base a Nodo Científico OTM IADIZA (CCT Mendoza) y SIAT Mendoza.

Se construyeron modelos considerando como variable respuesta a la conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación, obtenida durante un relevamiento de suelos realizado por Morábito *et al.* (2004) en el año 2002, a partir de un muestreo sistemático en el oasis norte (N=1014). Durante dicho relevamiento se estimó la CE para cada capa de suelo encontrada. Por lo que, en este estudio, se corrieron modelos para la CE del promedio de las tres primeras capas (n=1014), para la conductividad eléctrica de la primera capa (n=1014), de la segunda (n=985) y de la tercera capa (n=328).

Entre las variables predictoras se incluyeron factores que contribuyen a la vulnerabilidad natural del ambiente frente a la salinización y variables vinculadas a la presión antrópica. Entre las primeras se incluyó: elevación y pendiente, extraídas a partir de datos de elevación de SRTM (Jarvis *et al.*, 2008); índice de aridez, disponible libremente en el Sistema de Información Ambiental Territorial (SIAT) de Mendoza (SIAT, 2019); textura del suelo, estimada a partir del volumen de sedimentación, y cantidad de calcáreo total, ambos parámetros obtenidos a partir del mencionado muestreo de suelos (Morábito *et al.*, 2004). Entre las variables relacionadas con la presión antrópica se incluyeron dos medidas (distancia y densidad) para valorar el impacto de los canales de riego y los pozos de extracción de agua subterránea. La localización de los canales y los pozos constituye información otorgada por la

Dirección General de Irrigación (DGI) de Mendoza.

Los datos fueron analizados mediante *boosted regression trees*, por medio del software R (R Development Core Team, 2019) versión 3.5.3, utilizando el paquete *gbm* versión 2.1.5 y el código fuente *brt.functions.R* de Elith *et al.* (2008).

## Resultados y discusión

Los modelos espaciales construidos explicaron entre el 18,2 y el 45,9% de la variabilidad observada en los datos, detectando una mayor devianza explicada a medida que se utilizó como variable respuesta la CE obtenida a mayor profundidad (Tabla 1). Esto implica que las variables predictoras seleccionadas tienen mayor incidencia sobre la salinidad del suelo a mayor profundidad. Es esperable que otras variables asociadas al uso del suelo, tales como el tipo de cultivo o las medidas particulares de manejo implementadas, tengan mayor incidencia sobre la CE de las primeras capas del suelo.

**Tabla 1.** Influencia relativa (%) de las variables predictoras de los modelos desarrollados a partir de datos de 1014 (variables respuesta: CE prom y CE 1° capa), 985 (CE 2° capa) y 328 sitios (CE 3° capa), con una complejidad del árbol de 5 y una tasa de aprendizaje de 0,001. Para cada modelo se indica la devianza explicada (%).

Variable explicativa	Variable respuesta			
	CE prom	CE 1° capa	CE 2° capa	CE 3° capa
<b>Elevación</b>	<b>17,6</b>	<b>19,7</b>	<b>20,0</b>	<b>15,7</b>
Pendiente	4,4	8,1	6,0	4,3
Índice aridez	4,8	6,5	3,1	0,2
<b>Textura</b>	<b>21,2</b>	<b>14,7</b>	<b>20,8</b>	<b>42,1</b>
<b>Calcáreo</b>	<b>16,9</b>	<b>12,8</b>	<b>17,6</b>	<b>19,9</b>
Dist. canales	8,5	9,4	7,6	8,1
Dens. canales	10,6	10,4	9,0	0,9
Dist. pozos	6,6	7,8	8,4	6,4
Dens. pozos	9,4	10,6	7,5	2,6
Devianza explicada	18,2	20,2	22,9	45,9

Se identificó a elevación, textura del suelo y cantidad de calcáreo total como las variables que más explican la variación

espacial de la salinidad del suelo en el oasis norte de Mendoza (Tabla 1). En este estudio, todas las variables predictoras con mayor influencia relativa son variables que representan características del soporte físico-biológico, señalando la vulnerabilidad natural del ambiente al proceso analizado.

En la primera capa del suelo, la variable con mayor influencia relativa es la elevación. Ésta se encuentra correlacionada con la profundidad al nivel freático y otros autores señalan a la presencia de niveles freáticos próximos a la superficie como uno de los factores causales más importantes de la salinización secundaria (Morábito *et al.*, 2004; Mirábile *et al.*, 2006).

Con respecto a las características propias del suelo, la variable con mayor influencia relativa sobre el proceso de salinización en la segunda y tercera capa es la textura. Previamente, se había observado que suelos asociados a elevados valores de salinidad presentaban texturas pesadas, de franco limosa a franco arcillosa (Mirábile *et al.*, 2006). Asimismo, otra variable con gran influencia relativa es la cantidad de calcáreo total, lo cual podría estar vinculado con la presencia de una capa cementada con calcáreo que impida el drenaje en profundidad.

Cabe destacar que ninguna de las variables predictoras incorporadas en este estudio para representar el impacto de las presiones humanas obtuvo valores de influencia relativa importantes. Otros autores señalaron al mal manejo del recurso hídrico como un factor determinante en la salinización secundaria (Abraham, 2002; Mirábile *et al.*, 2006). Sin embargo, en este caso, ninguna de las variables descriptoras de la estructura del sistema de riego y drenaje resultó determinante.

Todas las variables incorporadas a los modelos desarrollados son espacialmente explícitas, lo que implica que puede conocerse la distribución espacial de sus valores en el oasis. Entendiendo esto en el marco del Ordenamiento Territorial provincial, resulta especialmente oportuno

para generar recomendaciones a los tomadores de decisiones. En este sentido, el Plan Provincial de Ordenamiento Territorial prevé implementar una serie de acciones a corto, mediano y largo plazo entre las que se establece aplicar instrumentos de planificación para limitar o promover actividades humanas tendientes a preservar y potenciar el cinturón verde agrícola atendiendo su especificidad (Gobierno de Mendoza, 2017). En este sentido, identificar las zonas vulnerables teniendo en cuenta los factores que causan la salinización secundaria, permitiría dar cuenta de las particularidades de cada región.

Asimismo, el conocimiento de los factores causales de la salinización secundaria posibilita el diseño de medidas de restauración que se adapten a este caso y promuevan la recuperación de dicho territorio. La restauración productiva implica la recuperación de algunos elementos de la estructura y función del ecosistema original, junto con una producción sustentable que genere bienes económicos para la población local (Ceccon, 2013). Por otro lado, el estudio de la distribución espacial de las variables predictoras puede contribuir a la identificación de sitios prioritarios para la restauración en el oasis (Guida-Johnson y Zuleta, 2017).

## Conclusiones

Los modelos espacialmente explícitos permiten conocer los factores causales de la degradación, así como identificar las áreas vulnerables a dichos procesos. En este sentido, constituyen herramientas valiosas para la planificación del territorio. Al identificar las causas de la salinización secundaria, resulta posible elaborar una zonificación que tenga en cuenta las características particulares de cada zona. De esta manera, es posible elaborar medidas de manejo específicas en zonas vulnerables y sitios prioritarios para la restauración, aumentando las posibilidades de éxito de las medidas

## Referencias

- Abraham, E. M. 2002. Lucha contra la desertificación en las tierras secas de Argentina. El caso de Mendoza. En: Fernández Cirelli, A., Abraham, E. M. (eds.) El agua en Iberoamérica. De la escasez a la desertificación. Cooperación Iberoamericana CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo. Buenos Aires. 27-44.
- Abraham, E. M., Soria, D., Rubio, C., Rubio, M. C., Virgillito, J. 2014. Modelo Territorial Actual, Mendoza, Argentina. Subsistema Físico-Biológico o Natural de la Provincia de Mendoza. Proyecto Ordenamiento Territorial para un Desarrollo Sustentable, PID-2009-00008.
- Ceccon, E. 2013. Restauración en bosques tropicales: fundamentos ecológicos, prácticos y sociales. Ediciones Díaz de Santos. México D.F.
- Dubovyk, O., Menz, G., Conrad, C., Kan, E., Machwitz, M., Khamzina, A. 2013. Spatio-temporal analyses of cropland degradation in the irrigated lowlands of Uzbekistan using remote-sensing and logistic regression modeling. *Environmental Monitoring and Assessment* 185, 4775-4790.
- Elith, J., Leathwick, J. R., Hastie, T. 2008. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology* 77, 802-813
- Gobierno de Mendoza. 2017. Plan Provincial de Ordenamiento Territorial de Mendoza. Ley N° 8.999.
- Guida-Johnson, B., Abraham, E. M., Cony, M. A. 2017. Salinización del suelo en tierras secas irrigadas: perspectivas de restauración en Cuyo. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Cuyo* 49(1), 205-215.
- Guida-Johnson, B., Zuleta, G. A. 2017. Riparian rehabilitation planning in an urban-rural gradient: integrating social needs and ecological conditions. *Ambio* 46, 578-587.
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., Guevara, E. 2008. Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Kassas, M. 1995. Desertification: a general review. *Journal of Arid Environments* 30, 115-128.
- Mirábile, C., Morábito, J., Manzanera M., Tozzi, D. 2006. Dinámica de la salinidad del suelo en el oasis del río Tunuyán inferior comparación 1985-2002. III Jornadas de Actualización en Riego y Fertirriego. Mendoza
- Morábito, J., Mirábile, C., Pizzuolo, P., Tozzi, D., Manzanera, M., Mastrantonio, L. 2004. Salinidad de suelos regadíos e incultos en el oasis norte de Mendoza. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., Roquero de Laburu, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- R Development Core Team 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Sales, R., Alonso Frank, A., Caamaño, M. G. 2018. Cambios de uso del suelo en tierras secas: reflexiones en torno a los escenarios de vulnerabilidad sísmica urbana. El caso del Área Metropolitana de San Juan, Argentina. Primera Jornada Nacional de Evaluación Integrada de la Desertificación: Enfoques y Metodologías Socioambientales. Mendoza
- SIAT. 2019. Índice de aridez. Disponible en: [http://www.siat.mendoza.gov.ar/data/geonode:indice\\_de\\_aridez](http://www.siat.mendoza.gov.ar/data/geonode:indice_de_aridez) [fecha de consulta: 25 junio 2019].
- UNCCD. 2012. Desertification: a visual synthesis. Disponible en: [http://catalogue.unccd.int/10\\_Desertification\\_EN.pdf](http://catalogue.unccd.int/10_Desertification_EN.pdf) [fecha de consulta: 6 agosto 2019].
- Zhang, T.-T., Zeng, S.-L., Gao, Y., Ouyang, Z.-T., Li, B., Fang, C.-M., Zhao, B. 2011. Assessing impact of land uses on land salinization in the Yellow River Delta, China using an integrated and spatial statistical model. *Land Use Policy* 28, 857-866.
- Zhou, D., Lin, Z., Liu, L., Zimmermann, D. 2013. Assessing secondary soil salinization risk based on the PSR sustainability framework. *Journal of Environmental Management* 128, 642-654.