



GUÍA DE CAMPO

RENS2019

32 Reunión Nacional de Suelos

Sevilla, 10-13 de septiembre de 2019



Tabla de contenido

Organización.....	1
Presentación.....	3
Las Reuniones Nacionales de Suelos (RENS).....	4
Programa.....	5
Martes, 10 de septiembre.....	5
Miércoles, 11 de septiembre.....	6
Jueves, 12 de septiembre.....	7
Viernes, 13 de septiembre.....	8
Ruta 1: Parque Nacional de Doñana.....	9
Introducción.....	9
Suelos del sistema eólico.....	9
Suelos del sistema estuarino.....	11
Perfiles de suelo del Parque Nacional de Doñana.....	13
Perfil 1-1. Typic Xeropsamment.....	13
Perfil 1-2. Dystric Xeropsamment.....	14
Perfil 1-3. Typic Humaquept.....	15
Perfil 1-4. Lithoplastic Xeropsamment.....	16
Perfil 1-5. Arenosol ortidístico.....	18
Perfil 1-6. Fluvisol gléyico.....	20
Perfil 1-7. Typic Haplaquoll.....	22
Perfil 1-8. Solonchak endosódico.....	25
Ruta 2: Aznalcóllar. Sus suelos, 20 años después.....	27
Introducción.....	27
Descripción general de la Cuenca del Río Guadiamar.....	27
Los suelos del Corredor Verde.....	28
El accidente minero de Aznalcóllar: contaminación de suelos.....	28
La restauración ambiental de la cuenca del Guadiamar.....	30
Itinerario.....	31
Parada 1: Mina de Aznalcóllar-Minera los Frailes.....	31
Parada 2. Corredor Verde del Guadiamar: Finca experimental el Vicario.....	32
Parada 3: Restauración de una gravera (área recreativa Las Doblas).....	33
Parada 4: Centro de Visitantes del Corredor Verde del Guadiamar (Aznalcázar).....	35
Parada 5: Parcela testigo de lodos (Vado del Quema).....	35
Ruta 3. Suelos de la campiña sevillana.....	37

Origen geológico y litología.....	37
Clima.....	38
Suelos	39
Breve historia del estudio de suelos en la zona	39
Descripción general.....	40
Itinerario.....	41
Parada 1. Perfil 3-1. Suelos vérticos en el Cortijo el Tomejil (IFAPA), Carmona	41
Parada 2, Perfil 3-2. Suelos rojos, Brenes.....	43
Referencias y bibliografía	46
Enlaces de interés	49
RENS	49
Organizadores	49
Instituciones	49
Colaboradores	49

Organización

Coordinación

José A. González Pérez
Antonio Jordán López

Comité científico

Gonzalo Almendros Martín
María Anaya Romero
Miquel Arán Mayoral
Manuel Árias Estévez
David Badía Villas
Gael Bárcenas Moreno
María Teresa Domínguez Núñez
Luis Ventura García Fernández
Heike Knicker
Rafael López Núñez
Engracia Madejón Rodríguez
Paola Madejón Rodríguez
Teodoro Marañón Arana
Lorena Martínez Zavala
José María de la Rosa Arranz
Jorge Mataix Solera
Irene Ortíz Bernad
Patricia Siljestrom
Arturo J. Pascual Granged
Raúl Zornoza Belmonte

Comité de honor

Nicolás Bellinfante Crocci
Francisco Cabrera Capitán
Luis Clemente Salas
Juan Cornejo Suero
Francisco J. González Vila
María del Carmen Hermosín Gaviño
Guillermo Paneque Guerrero (†)
Diego de la Rosa Acosta

Presentación

Este año 2019, tenemos la responsabilidad y el honor de celebrar la XXXII Reunión Nacional de Suelos en Sevilla. Las jornadas, han sido coordinadas por investigadores del campo de la edafología pertenecientes principalmente a la Universidad de Sevilla y al Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS-CSIC). Además, contamos con la colaboración de la empresa de base tecnológica Evenor Tech, Minera los Frailes y con el grupo HUMUS del MNCN-CSIC.

Han sido muchas las personas que han colaborado trabajando con ilusión para organizar una reunión interesante, para crear un espacio distendido y agradable que esperamos favorezca el intercambio de opiniones, las discusiones científicas y los nuevos proyectos de colaboración. Para ellas queremos expresar, en nombre de todos, nuestro reconocimiento y agradecimiento.

Con gran satisfacción les comunicamos que, como viene siendo habitual, este año contaremos también con una alta participación de la comunidad científica y técnica interesada en las ciencias del suelo, principalmente de España, aunque también contaremos con la presencia de algunos colegas extranjeros. Hemos tenido especial atención en promover la participación de nuestros jóvenes investigadores y en este sentido se han otorgado 15 becas de participación y la posibilidad de, además de en forma de panel, presentar su comunicación durante una pequeña intervención oral.

Esperamos sinceramente que el programa que hemos preparado para esta edición de la RENS les resulte interesante, deseamos que inicie nuevas vocaciones entre los jóvenes, inspire fructíferos debates y mantenga una discusión constructiva sobre el estado de nuestros suelos, sus usos, protección y, cuando sea necesario, su recuperación. En definitiva, es nuestra aspiración el haber aportado nuestro “microagregado de suelo” para el avance de la ciencia de la edafología en nuestro país.

Sevilla, septiembre 2018,

Los coordinadores:

José A. González Pérez

Antonio Jordán López

Las Reuniones Nacionales de Suelos (RENS)

Las Reuniones Científicas de Suelos, RENS, surgieron ante la necesidad de presentar de manera práctica a los miembros de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo y a otros investigadores interesados en Edafología, los suelos de unas determinadas comarcas y/o los resultados de un grupo de investigación en trabajos de campo. Dichas reuniones siguen un formato que incluye una jornada de recepción en un Centro académico o histórico del lugar donde se celebran, y dos o tres días de campo por las áreas

Durante la jornada de recepción se reúnen especialistas de todas las disciplinas que comprende la ciencia del suelo, como geología, botánica, climatología, agronomía y muchas otras, y se exponen los resultados de sus investigaciones.

En cada RENS, la organización se encarga de realizar un estudio exhaustivo de la zona a visitar que plasmaban en una memoria de la reunión. Estos documentos se aportan a los participantes de las jornadas como guías de campo, y sirven como base para el debate en las excursiones.

Desde la primera reunión, celebrada en Santiago de Compostela en 1973, se han realizado anual o bianualmente de manera ininterrumpida hasta la actualidad. La de 2019 es la segunda reunión que se realiza en Sevilla desde 1978.



Figura 1. Exposición de campo durante la RENS2013 (Mallorca). Discusión sobre suelos desarrollados en ambientes kársticos en Es Castellots (Escorca). Antonio Jordán/Imageo.

Programa

Martes, 10 de septiembre

Facultad de Biología (Edificio Rojo) de la Universidad de Sevilla, Campus de Reina Mercedes.

09:00	Registro y entrega de documentación	
10:00	Presentación de la XXXII Reunión Nacional de Suelos (RENS2019)	
10:15	Sesión de pósteres (I)	
11:30	Sesiones flash (I) Dr. David Badía Villas y Dra. María Teresa Domínguez Núñez	
	11:30	Primo Sánchez Morales Prácticas de conservación de suelos y agua en dos comunidades campesinas del poniente de Tlaxcala, México.
	11:35	Alba Llovet Effects of biochar addition to organo-mineral fertilisers on nutrient release and barley growth.
	11:40	Antonio Aguilar Garrido Descontaminación de aguas con arsénico a través de residuos de turbera.
	11:45	Judith Cano Ruíz La aplicación de compost reduce las necesidades hídricas de Arundo donax.
	11:50	Marco Antonio Jiménez González Chemometric prediction of soil organic matter quality and quantity from the pyrolytic patterns of N-bearing compounds.
	11:55	Preguntas y discusión
12:00	Café (comedor universitario)	
12:30	Sesiones flash II Dra. Irene Ortiz Bernard y Dr. José M. de la Rosa	
	12:30	Nicasio T. Jiménez Morillo. Aproximación ómica al estudio de la repelencia al agua del suelo mediante espectrometría de masas de ultra-alta resolución (FT-ICR/MS) de la materia orgánica y quimiometría predictiva.
	12:35	Marta Gil Martínez. Fungal functional diversity in trace element contaminated soils from Guadamar Green Corridor. Effects of biochar addition to organo-mineral fertilisers on nutrient release and barley growth.
	12:40	Marco Criado Nicolás. Comparativa de métodos de evaluación de la calidad del suelo en un ecosistema semiárido (norte de Salamanca).
	12:45	Layla M. San Emeterio. Análisis de biomarcadores de la materia orgánica del suelo mediante pirólisis analítica acoplada a cromatografía de gases (Py-GC/MS) y el uso de isótopos estables (Py-GC/IRMS).
	12:50	Marino Pedro Reyes Martín. Actividad deshidrogenasa y glucosidasa en suelos de cultivos subtropicales bajo restos de poda.
	12:55	Preguntas y discusión
13:00	Sesión de pósteres (I)	
14:00	Almuerzo (comedor universitario)	
15:30	Conferencia: Análisis de parámetros edáficos y ecofisiológicos relacionados con el nivel de nutrientes y el crecimiento de <i>Pinus pinaster</i> en suelos ácidos Dra. Cristina Eimil Fraga <i>Premio SECS a la mejor Tesis Doctoral de 2017</i>	

16:15	Café (vestíbulo del Edificio Rojo de la Facultad de Biología)
16:30	Asamblea General de la SECS Entrega del Premio SECS a la mejor Tesis Doctoral al Dr. Nicasio T. Jiménez Morillo por su trabajo “Bio-geochemical markers surrogated to fire induced hydrophobicity. Model system: Doñaña National Park sandy soil”.

Miércoles, 11 de septiembre

Visita al Parque Nacional de Doñana (Figura 2).

Luis Clemente Salas, José A. González Pérez, Francisco J. González Vila, Patricia Siljestrom, Luís Ventura García Fernández.

12:00	Salida Recogida: Hotel Exe y Avda. Reina Mercedes
13:30	Almuerzo (Matalascañas)
16:00	Visita edafológica al P.N. de Doñana
21:30	Cena (Aldea de El Rocío)
00:00	Regreso a Sevilla Paradas: Hotel Exe y Avda. Reina Mercedes

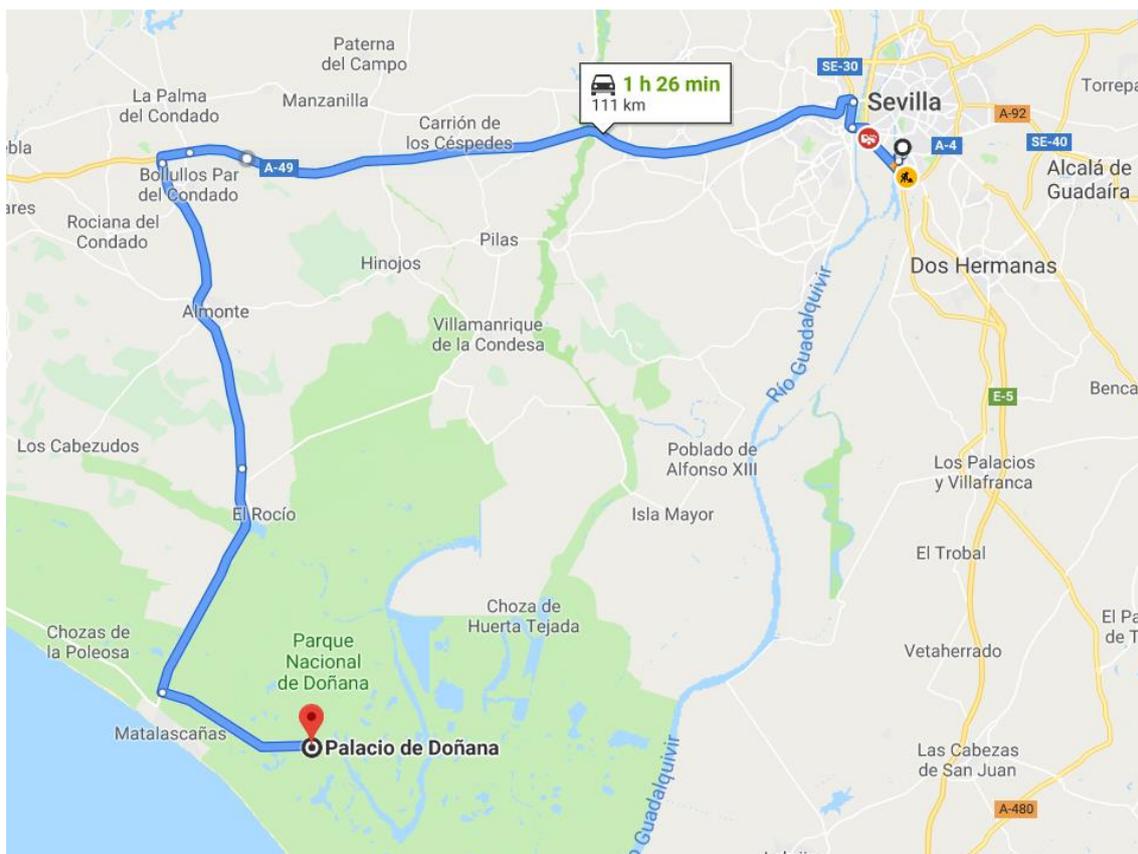


Figura 2. Ruta 1, visita al P.N. de Doñana.

Jueves, 12 de septiembre

Azncalcóllar: sus suelos, 20 años después (Figura 3).

08:00	Salida Recogida Vuelta: Hotel Exe y Avda. Reina Mercedes
10:00	Visita edafológica <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mina Los Frailes ▪ Corredor Verde del Guadiamar
14:00	Almuerzo (Azncalcóllar)
16:00	Regreso a Sevilla Paradas: Hotel Exe y Avda. Reina Mercedes

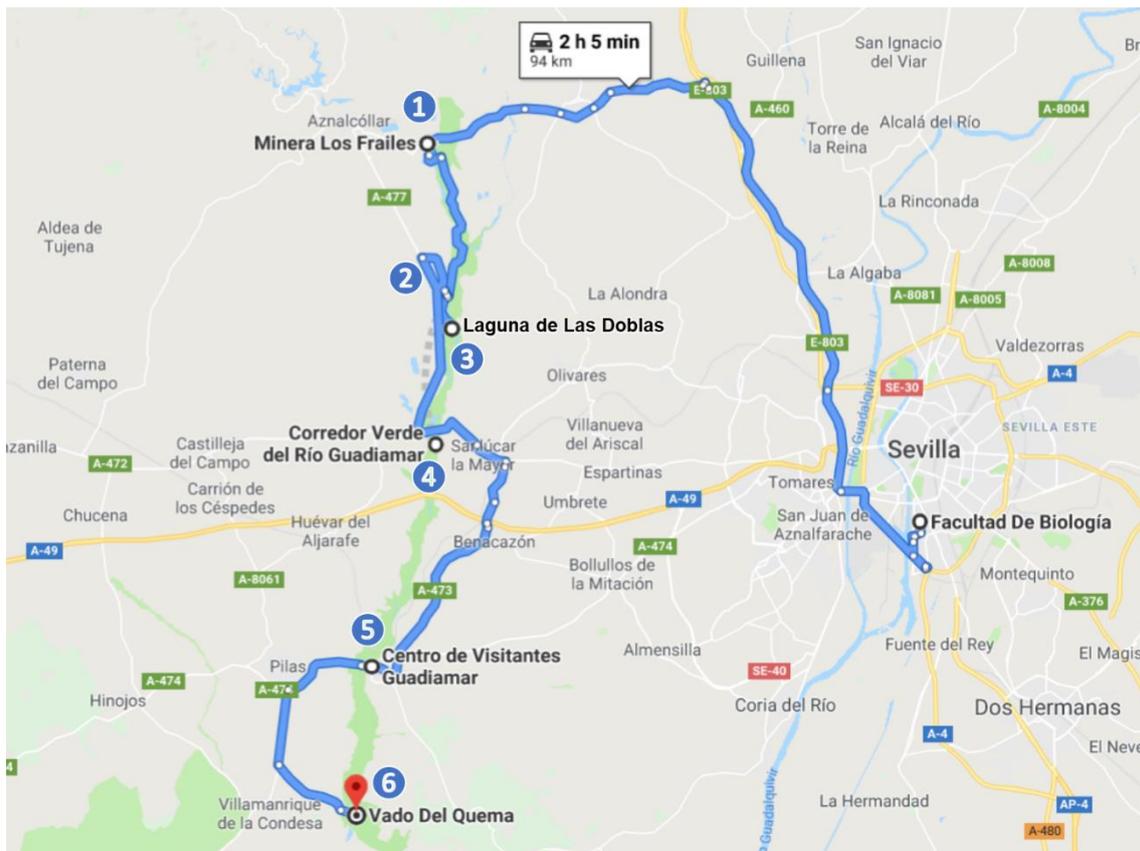


Figura 3. Ruta 2, visita a Azncalcóllar.

Viernes, 13 de septiembre

Campaña de Sevilla: suelos mediterráneos (Figura 4).

08:00	Salida Recogida Vuelta: Hotel Exe y Avda. Reina Mercedes
09:00	Visita edafológica <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cortijo Tomejil (IFAPA) ▪ Campiña de Brenes
12:30	Aperitivo andaluz (El Viso del Alcor)
14:00	Regreso a Sevilla Paradas: Aeropuerto de San Pablo, Estación de Sta. Justa, Hotel Exe y Avda. Reina

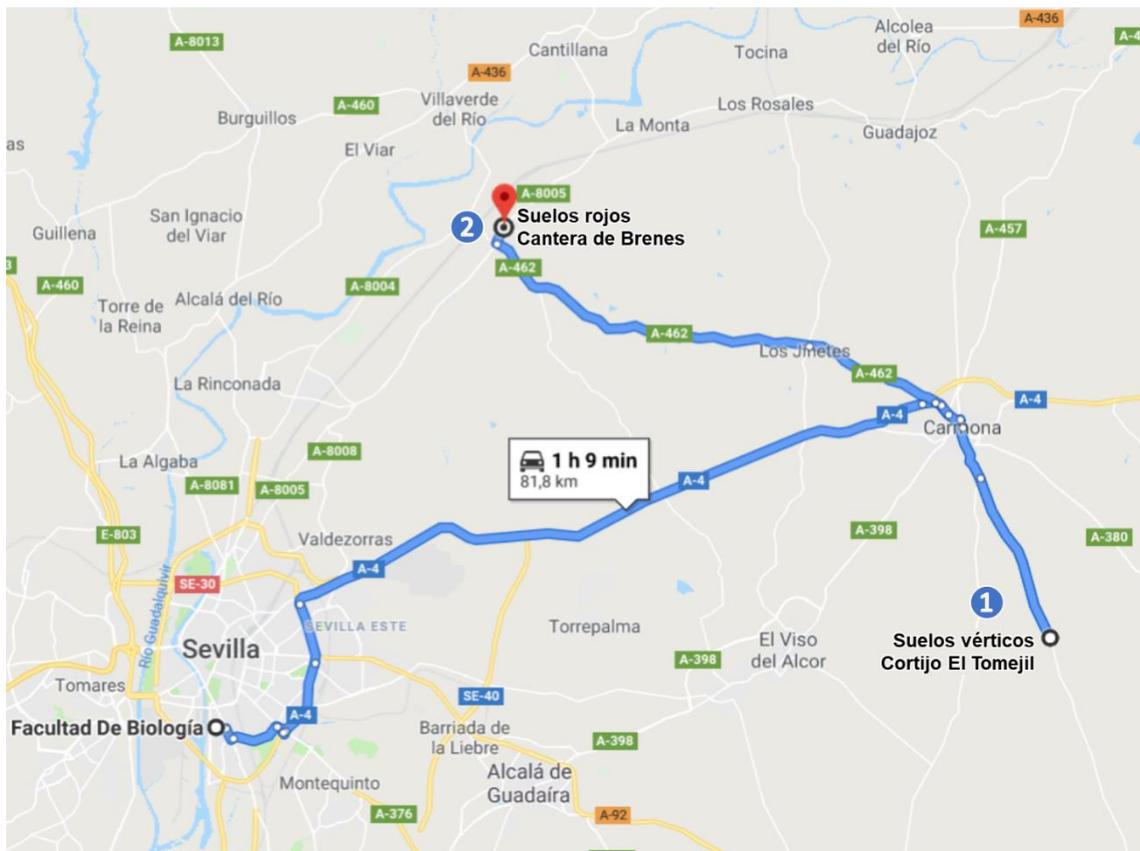


Figura 4. Ruta 3, visita a la campiña de Sevilla.

Ruta 1: Parque Nacional de Doñana

Introducción

El Parque Nacional de Doñana se considera la mayor reserva ecológica de Europa y tiene fama universal. Su gran extensión de marismas acoge durante el invierno a numerosas especies de aves acuáticas, que suelen alcanzar cada año los 200.000 individuos. Muy próximos a Doñana se localizan otros espacios naturales que, aunque situados fuera de los límites del Parque Nacional, comparten paisajes similares (así como el hábitat de diversas especies animales y vegetales) que comparten vegetación y usos (masas forestales de pinos, marismas más o menos transformadas) y tramos de brazos y caños del río Guadalquivir que antiguamente inundaban la marisma (Bellinfante et al., 2007).

El estado de especial conservación del Parque Nacional de Doñana (Figura 5) nos permite estudiar la génesis y evolución de los suelos en detalle, así como su relación con los principales factores pedogenéticos; principalmente los materiales parentales, el clima, la vegetación y la geomorfología.

Atendiendo a los materiales parentales, en Doñana se distinguen dos grandes sistemas morfogenéticos (Clemente et al., 1998):

- a) Sistema eólico, constituido por arenas de la deriva litoral y depositadas hacia el interior por el viento
- b) Sistema estuarino, constituido por sedimentos aluviales finos que colmatan el antiguo estuario del Guadalquivir y que constituyen las actuales marismas.

Para cada uno de los sistemas, tanto el material parental como el clima pueden considerarse constantes, mientras que los cambios en la vegetación y la geomorfología serán los principales factores responsables de la diversidad edáfica de la zona.

La geomorfología del terreno es quizá el factor pedogenético más relevante en Doñana; condiciona la profundidad del nivel freático que es decisivo en el área de arenas, y los procesos de encharcamiento y circulación del agua que son importantes en el área de marismas. Éstos a su vez condicionan la cobertura vegetal en cada zona y la salinidad -muy condicionada por la microtopografía- es otro factor decisivo en la evolución y clasificación de los suelos, principalmente en el sistema estuarino (marisma).

Suelos del sistema eólico

Los suelos del sistema eólico se forman sobre arenas procedentes de la erosión del farallón costero que se van transportado por la corriente de la deriva litoral y que se depositan hacia el interior por el viento.

Una línea imaginaria trazada entre Matalascañas y el Palacio de Doñana, separa hacia el norte un vasto complejo dunar inmovilizado por la vegetación y formado por varias generaciones dunares desmanteladas por la deflación, la fluctuación de la capa freática, así como por el arroyamiento somero correspondiente al drenaje de la zona hacia la marisma. Al sur de la citada línea aparece un sistema de dunas móviles actuales formadas por tres o cuatro frentes con ondulaciones alineadas, paralelas a la costa y transversales al viento dominante.



Figura 5. Sistemas de tierra del Parque Nacional y Natural de Doñana (Bellinfante, 2007; Jordán et al., 2009).

Al sureste del Parque las dunas móviles cubren parcialmente depósitos marinos en forma de crestas que alternan con pequeñas depresiones que se encharcan en épocas lluviosas, es la zona conocida como “Marismillas”. Por su parte, las áreas de contacto entre las arenas móviles y estabilizadas, y entre éstas y la marisma, definen zonas que presentan características morfológicas variadas y diferentes a las áreas que limitan.

En el Sistema Eólico podemos identificar tres Unidades Geomorfológicas principales:

- a) Arenas estabilizadas (que incluyen los cordones de Malismillas)
- b) Arenas móviles
- c) Zonas de contacto.

En estas zonas arenosas se han desarrollado suelos cuya evolución viene marcada por la antigüedad y origen de los depósitos arenosos (eólicos o litorales). por la profundidad del nivel freático y, como consecuencia de ambos, por la densidad de la cobertura vegetal.

Debido a la estabilidad estructural del material original, los suelos son poco evolucionados (Entisoles). En áreas con mayor cobertura vegetal, lo que depende de la proximidad de la capa freática, puede aparecer un horizonte orgánico lo suficientemente potente como para definir epipedones úmbricos (Inceptisoles) o móllicos (Mollicoles), en función de la saturación en bases de su complejo de cambio y en casos excepcionales se han descrito epipedones hísticos (Histosoles).

Asociados a pequeñas lagunas temporales, capaces de captar elementos finos eólicos o a zonas de acumulación de sedimentos finos aluviales, aparecen suelos que llegan a desarrollar un horizonte de acumulación de arcillas (Alfisolos).

En resumen, dentro del Sistema Eólico se han reconocido suelos pertenecientes a los siguientes órdenes de la "Soil Taxonomy": Entisoles, Inceptisoles, Mollicoles, Alfisolos e Histosoles.

Suelos del sistema estuarino

Se forman sobre sedimentos finos que se han ido depositando en el antiguo estuario del Guadalquivir durante el Holoceno y que han dado lugar a las actuales marismas. La actual marisma de Doñana es un delta interno recorrido por canales inestables, una planicie aluvial que se inunda y deseca estacionalmente.

La mayor parte de marismas del parque es "marisma baja" (cota inferior a 2 m sobre el cero geográfico), alguna es "marisma media" (cota entre 2 y 3 m) mientras que la "marisma alta" (cota superior a 3 m) constituyen la "premarisma" y se encuentra en zonas próximas al ecotono Vera-Retuerta.

En el Sistema Estuarino, el microrrelieve es el criterio básico para la diferenciación de unidades y subunidades geomorfológicas. En la marisma se distinguen zonas de bancos o elevaciones (vetas y paciles), zonas de transición (antiguas depresiones o cauces colmatados) y las depresiones (caños y lucios).

Las características fundamentales de los suelos de la marisma están condicionadas por el carácter reciente de los sedimentos a partir de los cuales se han desarrollado (suelos estratificados y poco evolucionados) y por sus características físico-químicas (arcillosos, calcáreos y salinos) muy dependiente de la posición fisiográfica y geográfica. Otros factores que influyen localmente en los procesos de formación y diferenciación de los suelos son la presencia de arenas conchíferas o silíceas, surgencias (ojos), corrientes de agua dulce y la influencia mareal.

Los suelos dominantes en el Sistema Estuarino carecen por lo general de rasgos indicativos de evolución del perfil (Entisols) aunque la acumulación de sales, por ascenso capilar y evaporación desde de la capa freática, permite definir suelos hipersalinos (Aridisols). En zonas de premarisma, los sedimentos arcillosos evolucionan hacia suelos poco salinos con características vérticas (Vertisols). Puntualmente, las surgencias de agua dulce dentro de la marisma salina da lugar a la aparición de características propias de suelos incipientes (Inceptisols).

En la marisma encontramos también zonas con suelos alterados por la acción humana más o menos reciente. Se trata de materiales que han quedado expuestos tras la excavación de zonas

de marisma o de acúmulos de materiales extraídos del entorno para la construcción de diques o muros. Carecen de una morfología definida, sin evidencia de procesos edafogénicos y que pueden tipificarse como materiales antropogeomórficos de tipo Spólico.

En resumen, dentro del sistema estuarino se han reconocido suelos pertenecientes a cuatro órdenes de la "Soil Taxonomy": Aridisols, Entisols, Inceptisols, Vertisols.

Perfiles de suelo del Parque Nacional de Doñana

Perfil 1-1. Typic Xeropsamment

Suelo propio de las partes altas de dunas fijas con nivel freático relativamente profundo incluso en la época más húmeda.



Figura 6. Perfil 1-1 (Typic Xeropsamment; izquierda) y entorno (alto de dunas en el área de Naves, Parque Nacional de Doñana; derecha). Clemente et al. (1998).

Tabla 1. Perfil 1-1; entorno.

Nombre del perfil	Typic Xeropsamment (USDA)
Observadores	Luis Clemente, Luis V. García y Patricia Siljeström (IRNAS/CSIC)
Localización	Duna fija (Parque Nacional de Doñana)
Pendiente	2 – 6%
Drenaje superficial	Algo excesivamente drenado
Drenaje interno	Excesivamente drenado
Profundidad de la capa freática	> 3 m
Elemento morfoedáfico	Alto de nave
Material original	Arenas eólicas
Vegetación	Asociación Rhamno-Juniperum lyciae

Tabla 2. Perfil 1-1; datos morfológicos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 15	10YR 4/4 (h), pardo amarillento oscuro; arenoso; de grano suelto a migajosa muy fina; suelto en seco, muy friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces finas y medianas abundantes; actividad biológica escasa; límite gradual y plano.
AC	15 – 40	10YR 5/6 (h), pardo amarillento; arenoso; grano suelto; muy suelto en seco, muy friable a suelto en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces finas y medias frecuentes; actividad biológica no apreciable; límite gradual y plano.
C	20 – 200	10YR 6/8 (h), amarillo parduzco; arenoso; suelto en seco; raíces escasas.

Perfil 1-2. Dystric Xeropsamment

Suelo de las partes más bajas de dunas fijas, dónde el nivel freático se refleja en el perfil del suelo mediante señas de hidromorfía y/o acidez.



Figura 7. Perfil 1-2 (Dystric Xeropsamment; izquierda) y entorno (laderas de dunas en el área de Naves, Parque Nacional de Doñana; derecha). Clemente et al. (1998).

Tabla 3. Perfil 1-2; entorno.

Nombre del perfil	Dystric Xeropsamment (USDA)
Observadores	Luis Clemente, Luis V. García y Patricia Siljeström (IRNAS/CSIC)
Localización	Nave moteada (Parque Nacional de Doñana)
Pendiente	2 – 6%
Drenaje superficial	Algo excesivamente drenado
Drenaje interno	Algo excesivamente drenado
Profundidad de la capa freática	240 cm (diciembre de 1982); > 2 m (febrero de 1985)
Elemento morfoedáfico	Ladera de naves
Material original	Arenas eólicas
Vegetación	Asociación Halimio halimifolii – Stauracanthetum genistoides

Tabla 4. Perfil 1-2; datos morfológicos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 20	10YR 3/3 (h), pardo oscuro; textura arenosa; estructura migajosa muy fina tendente a grano suelto; suelto en seco, friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces medianas y finas abundantes; actividad biológica media; límite neto y plano.
AC	20 – 75	10YR 5/4 (h), pardo amarillento con manchas escasas asociadas a raíces; textura arenosa; grano suelto en seco, friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces finas y muy finas abundantes; actividad biológica baja; límite gradual y ondulado.
Cg1	75 - 110	10YR 7/4 (h), amarillo pálido con algunas manchas asociadas a raíces; textura arenosa; suelto en seco, muy friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces escasas; no se aprecia actividad biológica; límite gradual y ondulado.
C	110 – 220	2.5YR 7/4 (h), amarillo pálido con algunas manchas asociadas a raíces; textura arenosa; suelto en seco, muy friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces escasas; no se aprecia actividad biológica; límite gradual y ondulado.
Cg2	220 – 260	2.5YR 7/3 (h), gris pálido con algunas manchas difusas por hidromorfía (10YR 6/8 (h) amarillo-parduzcas) aumentando su frecuencia en profundidad hasta dominar a partir de 2.6 m.

Perfil 1-3. Typic Humaquept

Suelos influenciados por la cubierta vegetal y la presencia un nivel freático a escasa profundidad que en ocasiones puede aflorar. Desarrollan un horizonte húmico que puede llegar a hístico, aunque en el caso del ejemplo se corresponde a un epipedón úmbrico. Son los suelos más abundantes en el Sistema Eólico del Parque Nacional de Doñana.

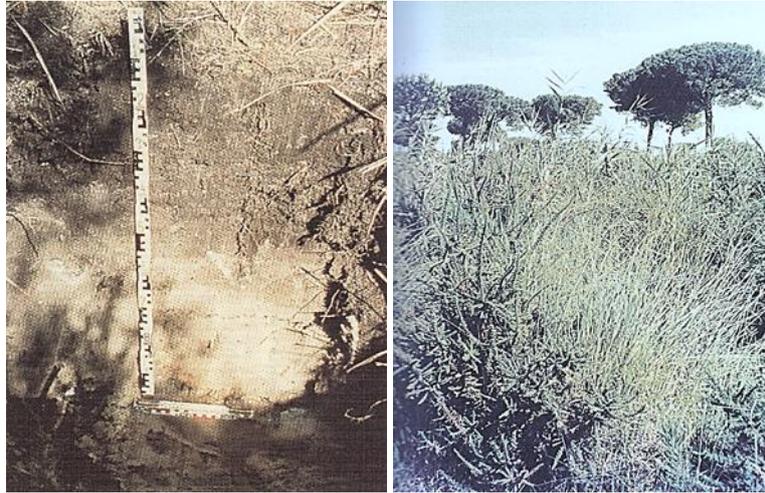


Figura 8. Perfil 1-3 (Typic Humaquept; izquierda) y entorno (pinar del Raposo, Parque Nacional de Doñana; derecha). Clemente et al. (1998).

Tabla 5. Perfil 1-3; entorno.

Nombre del perfil	Typic Humaquept (USDA)
Observadores	Luis Clemente, Luis V. García y Patricia Siljeström (IRNAS/CSIC)
Localización	Raposo bajo (Parque Nacional de Doñana)
Pendiente	0 – 2%
Drenaje superficial	Imperfectamente drenado
Drenaje interno	Imperfectamente drenado
Profundidad de la capa freática	90 cm (octubre de 1979); 30 cm (febrero de 1985)
Elemento morfoedáfico	Bajo de duna
Material original	Arenas eólicas
Vegetación	Asociación <i>Erico scopariae</i> – <i>Ulicetum australis</i>

Tabla 6. Perfil 1-3; datos morfológicos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah1	0 – 35	5YR 2.5/1 (h), negro; textura arenosa franca; estructura migajosa fina; suelto en seco, muy friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces finas y medias muy frecuentes; buena actividad biológica; límite gradual y plano.
Ah2	35 – 45	5YR 3/1 (h), gris muy oscuro; textura arenosa; estructura migajosa muy fina; suelto en seco, muy friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces finas muy frecuentes; escasa actividad biológica; límite neto plano.
AC	45 – 65	7.5YR 4.5/2, pardo; textura arenosa; grano suelto; suelto en seco y en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces finas frecuentes y medianas escasas; límite gradual y plano.
Cg	> 65	10YR 6/2, gris parduzco, con algunas manchas pardas difusas asociadas a restos vegetales; textura arenosa; grano suelto; suelto en seco y en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces finas frecuentes y medianas escasas; límite gradual y plano.

Perfil 1-4. Lithoplintic Xeropsamment

Suelo propio de las partes de contacto entre arenas estabilizadas y la zona de marisma. En algunos casos presentan costras ferruginosas muy duras (lithoplinthita) conocida en la zona cómo “moco de herrero”.



Figura 9. Perfil 1-4 (Lithoplintic Xeropsamment; izquierda) y entorno (Cerrado Alcornoques, Parque Nacional de Doñana; derecha). Clemente et al. (1998).

Tabla 7. Perfil 1-4; entorno.

Nombre del perfil	Lithoplintic Xeropsamment (USDA)
Observadores	Luis Clemente, Luis V. García y Patricia Siljeström (IRNAS/CSIC)
Localización	Cerrado Alcornoques (Parque Nacional de Doñana)
Pendiente	0 – 2%
Drenaje superficial	Moderadamente bien drenado
Drenaje interno	Algo excesivamente drenado
Profundidad de la capa freática	160 cm
Elemento morfoedáfico	Vera arenosa
Material original	Arenas eólicas
Vegetación	Pteridium aquilinum L.

Tabla 8. Perfil 1-4; datos morfológicos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah1	0 – 10	10YR 4/3 (h), pardo a pardo oscuro; 10YR 5/3 (s), pardo; textura arenosa, grano suelto; suelto en seco, friable a suelto en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces finas abundantes en los primeros centímetros y algunas medianas y gruesas hacia la base del horizonte; frecuentes restos de tallos y raíces secas; escasa actividad biológica; límite gradual y plano.
Ah2	10 – 25	7.5YR 4/4 (h), pardo a pardo oscuro; 10YR 5/4 (s), pardo; textura arenosa; grano suelto; suelto en seco, muy friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; sin raíces ni actividad biológica apreciable; límite difuso y plano.
ACg	25 – 60	7.5YR 4/4 (h), pardo a pardo oscuro; 10YR 5/4 (s), pardo; manchas ferruginosas aisladas muy difusas; textura arenosa; grano suelto; suelto en seco, muy friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; algunas raíces finas y sin actividad biológica apreciable; límite gradual y plano.
Cg	60 – 90	7.5YR 4/4 (h), pardo a pardo oscuro; 10YR 5/4 (s), pardo; manchas de óxido-reducción, más frecuentes, nítidas y gruesas con la profundidad; textura arenosa;

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
		grano suelto que tiende a formar pequeños agregados migajosos; suelto en seco, suelto a muy friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; límite brusco y discontinuo.
Cms	90 – 120	Costra ferruginosa, litoplántica, muy dura en general y frágil en algunos puntos, de superficie rugosa alveolar, con oquedades rellenas de arena y raíces, con fuerte y desigual liberación de óxidos férricos de color pardo rojizo (2.5YR 2.5/4), más oscuros hacia la periferia de los cortes más duros; límite brusco y discontinuo.
C1	120 – 160	10YR 6/6 (h), amarillo parduzco; textura arenosa; grano suelto con tendencia a formar ligeros agregados migajosos; límite neto y plano.
C2	> 160	10YR 5/8 (h), pardo amarillento; textura arenosa; estructura migajosa fina.

Perfil 1-5. Arenosol ortidístico

Son suelos muy comunes en el sistema de dunas estabilizadas, bajo matorral, de un desarrollo muy simple (A – C), textura muy arenosa y muy bajo desarrollo de estructura. En general son muy permeables y el nivel freático suele encontrarse a relativa profundidad.



Figura 10. Entorno del perfil 1-5 (Arenosol ortidístico), cerca de El Rocío (Parque Nacional de Doñana, Huelva).
Antonio Jordán/Imageo.

Tabla 9. Perfil 1-5; entorno.

Nombre del perfil	Arenosol ortidístico (WRB)
Localización	El Rocío (Parque Nacional de Doñana)
Coordenadas	37.09690, -6.476282
Observadores	Nicolás Bellinfante, Antonio Jordán, Lorena M. Zavala (MED_Soil Research Group, Universidad de Sevilla)
Pendiente	0 – 2%
Relieve	Llano
Erosión	Nula
Drenaje superficial	Algo deficiente
Posición topográfica	Llanura
Material original	Arenas eólicas
Vegetación	Monte bajo

Tabla 10. Perfil 1-5; datos morfológicos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 15	10YR 5/3 (s), pardo, y 10YR 3/3 (h), pardo oscuro; textura arenosa; sin estructura; suelto en seco y húmedo, no plástico y no adherente en mojado; poros abundantes de todos los tamaños; sin raíces; límite difuso plano.
C	> 15	10YR 6/4 (s), pardo claro amarillento, y 10YR 4/4 (h), pardo amarillento oscuro; textura arenosa; sin estructura; suelto en seco y húmedo, no plástico y no adherente en mojado; poros escasos (muy compactado); sin raíces.

Tabla 11. Perfil 1-5; Grava (%), fracciones texturales (%), clasificación de la textura, densidad aparente (DA; g cm⁻³) capacidad de retención hídrica del suelo (RH a 0, 33 y 1500 kPa; %).

Horizonte	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	DA	RH (0 kPa)	RH (33 kPa)	RH (1500 kPa)
A	3.0	97.95	1.88	0.18	Arenosa	1.55	8.04	1.99	1.70
C	10.0	96.96	1.06	1.98	Arenosa	1.63	9.78	4.64	1.18

Tabla 12. Perfil 1-5; acidez (en H₂O y KCl), salinidad (CE, dS m⁻¹), carbonatos (%), carbono orgánico (%) y nitrógeno Kjeldahl (%).

Horizonte	pH (H ₂ O, 1:2.5)	pH (KCl, 1:2.5)	CE (1:5)	Carbonatos	C orgánico	N Kjeldahl
A	6.1	5.6	0.119	0.00	1.13	0.11
C	7.5	6.0	0.068	3.54	0.60	0.06

Tabla 13. Perfil 1-5; P-Olsen (mg kg⁻¹) y oligoelementos asimilables (Fe, Mn, Cu y Zn; mg kg⁻¹).

Horizonte	P-Olsen	Fe	Mn	Cu	Zn
A	5.0	0.051	0.071	0.001	0.003
C	3.0	0.005	0.008	0.001	0.001

Tabla 14. Perfil 1-5; cationes de cambio (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺, cmol (+) kg⁻¹), capacidad de intercambio catiónico (CIC, cmol (+) kg⁻¹) y saturación del complejo de cambio (V, %).

Horizonte	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CIC	V
A	0.012	5.410	0.170	0.370	7.460	79.920
C	0.028	0.855	0.300	0.479	10.920	15.220

Perfil 1-6. Fluvisol gléyico

Suelo característico de las áreas planas inundables, incluso sometidas a la influencia de la marea (marismas). La vegetación es generalmente herbácea, aunque la cobertura puede ser muy densa. La textura del suelo no es tan arenosa como en otros casos, pudiendo oscilar entre franco arenosa y franco arcillosa en superficie. Con frecuencia, se observan rasgos de pseudogley relativamente cerca de la superficie.



Figura 11. Entorno del perfil 1-6 (Fluvisol gléyico), en Casa de Martinazo (Parque Nacional de Doñana, Huelva).
Antonio Jordán/Imaggeo.

Tabla 15. Perfil 1-6; entorno.

Nombre del perfil	Fluvisol gléyico (WRB)
Localización	Casa de Martinazo (Parque Nacional de Doñana)
Coordenadas	37.02665, -6.43535
Observadores	Nicolás Bellinfante, Antonio Jordán, Lorena M. Zavala (MED_Soil Research Group, Universidad de Sevilla)
Pendiente	0 – 2%
Relieve	Llano
Erosión	Nula
Drenaje superficial	Deficiente
Posición topográfica	Llanura
Material original	Sedimentos aluviales recientes
Vegetación	Vegetación herbácea

Tabla 16. Perfil 1-6; datos morfológicos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 20	7.5YR 5/2 (s), pardo, y 7.5YR 3/2 (h), pardo oscuro; textura franca; estructura migajosa gruesa, fuertemente desarrollada; duro en seco, firme en húmedo, plástico y adherente en mojado; poros escasos y finos; raíces abundantes y finas; nódulos calizos escasos, sin reacción calcárea apreciable; límite neto plano.
Bw	20 – 60	7.5YR 5/2 (s), pardo, y 7.5YR 3/2 (h), pardo oscuro; textura arcillosa; estructura poliédrica angular gruesa, fuertemente desarrollada; muy duro en seco muy firme en húmedo, muy plástico y muy adherente en mojado; poros escasos y finos; sin raíces; sin nódulos, pero con reacción calcárea fuerte; límite neto plano.
Cg	> 60	10YR 6/2 (s), gris pardusco claro, y 10YR 4/2 (h), pardo grisáceo oscuro, rasgos gléyicos; textura franca; estructura masiva; muy duro en seco, muy firme en húmedo, muy plástico y muy adherente en mojado; poros escasos y finos; sin raíces; nódulos calizos abundantes, reacción calcárea muy fuerte.

Tabla 17. Perfil 1-6; Grava (%), fracciones texturales (%), clasificación de la textura, densidad aparente (DA; g cm⁻³) capacidad de retención hídrica del suelo (RH a 0, 33 y 1500 kPa; %).

Horizonte	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	DA	RH (0 kPa)	RH (33 kPa)	RH (1500 kPa)
A	0.0	37.95	44.33	17.72	Franca	1.04	46.4	26.0	11.6
Bw	0.0	22.86	19.8	57.34	Arcillosa	1.42	54.0	45.9	33.0
Cg	0.5	44.45	31.07	24.48	Franca	1.39	47.7	26.9	14.5

Tabla 18. Perfil 1-6; acidez (en H₂O y KCl), salinidad (CE, dS m⁻¹), carbonatos (%), carbono orgánico (%) y nitrógeno Kjeldahl (%).

Horizonte	pH (H ₂ O, 1:2.5)	pH (KCl, 1:2.5)	CE (1:5)	Carbonatos	C orgánico	N Kjeldahl
A	6.5	6.3	0.142	0.00	4.26	0.37
Bw	7.4	7.4	0.238	0.99	0.24	0.03
Cg	7.7	7.6	0.287	1.06	1.34	0.13

Tabla 19. Perfil 1-6; P-Olsen (mg kg⁻¹) y oligoelementos asimilables (Fe, Mn, Cu y Zn; mg kg⁻¹).

Horizonte	P-Olsen	Fe	Mn	Cu	Zn
A	11.0	0.055	0.884	0.019	0.018
Bw	4.0	0.09	0.097	0.001	0.006
Cg	5.0	0.011	0.024	0.002	0.003

Tabla 20. Perfil 1-6; cationes de cambio (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺, cmol (+) kg⁻¹), capacidad de intercambio catiónico (CIC, cmol (+) kg⁻¹) y saturación del complejo de cambio (V, %).

Horizonte	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CIC	V
A	32.880	1.950	0.450	1.310	36.590	100.000
Bw	0.365	23.827	2.810	10.962	70.640	53.743
Cg	22.671	2.329	0.510	0.440	25.950	100.000

Perfil 1-7. Typic Haplaquoll

Suelos de evolución condicionada por un régimen de humedad áquico debido al alto nivel freático. El ejemplo que presentamos se corresponde con un suelo bajo “manto arrasado” cercano a la Laguna de Santa Olalla. Clemente et al. (1998).



Figura 12 Perfil 1-7 (Typic Haplaquoll; izquierda) y entorno (manto arrasado al norte de la Laguna de Santa Olalla, Parque Nacional de Doñana; derecha).

Tabla 21. Perfil 1-7; entorno.

Nombre del perfil	Typic Haplaquoll (USDA)
Localización	Laguna de Santa Olalla (Parque Nacional de Doñana)
Observadores	Luis Clemente, Luis V. García y Patricia Siljeström (IRNAS/CSIC)
Pendiente	0 – 2%
Drenaje superficial	Imperfectamente drenado
Drenaje interno	Moderadamente bien drenado
Profundidad de la capa freática	80 cm (febrero de 1983); 140 cm (octubre de 1983); 10 cm (febrero de 1985)
Elemento morfoedáfico	Bajo de duna
Material original	Arenas eólicas
Vegetación	Asociación <i>Erico scopariae</i> – <i>Ulicetum australis</i>

Tabla 22. Perfil 1-7; datos morfológicos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah1	0 – 20	10YR 2.5/1 (h), negro; 10YR 3/1 (s), gris muy oscuro; textura arenosa franca; estructura migajosa; suelto en seco, friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces gruesas a finas muy abundantes; actividad biológica alta, límite gradual ondulado.
Ahu2	20 – 50	10YR 3/1 (h), gris muy oscuro, 10YR 4/1 (s), gris oscuro; textura arenosa; estructura migajosa tendente a grano suelto; suelto en seco, friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; raíces muy finas a medias muy abundantes; actividad biológica alta; límite gradual ondulado.
AC	50 – 70	7.5YR 4/2 (h), pardo; 7.5YR 6/2 (s), gris rosáceo; textura arenosa; grano suelto; suelto en seco, friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; sin raíces ni actividad biológica apreciable; límite gradual ondulado.
C1	70 – 110	10YR 6/4 (h), gris pardo pálido; ; textura arenosa; grano suelto; suelto en seco, friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; sin raíces ni actividad biológica apreciable; límite gradual ondulado.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
C1g	110 – 140	2.5YR 6.4, pardo amarillento con moteado 10YR 7/8, amarillo, y 5YR 5/8, rojo amarillento; textura arenosa; grano suelto; suelto en seco, friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; sin raíces ni actividad biológica apreciable; límite gradual ondulado.
C2	> 140	2.5YR 6/2, gris parduzco claro; textura arenosa; grano suelto; suelto en seco, friable en húmedo, no plástico y no adherente en mojado; sin raíces ni actividad biológica apreciable.

Tabla 23 Perfil 1-7; fracciones texturales (%) y clasificación de la textura.

Horizonte	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura
Ah1	86.5	5.0	8.5	Arenosa franca
Ah2	91.2	4.1	4.7	Arenosa
AC	97.7	0.3	2.0	Arenosa
C1	98.8	0.2	1.0	Arenosa
C1g	97.5	0.5	2.0	Arenosa
C2	98.3	0.2	1.5	Arenosa

Tabla 24. Perfil 1.7; Materia orgánica (%), C/N, carbonatos (%), acidez (pH), capacidad de intercambio catiónico (CIC, cmol (+) kg⁻¹) y saturación del complejo de cambio (V, %) y Fe₂O₃ libre y total (%).

Horizonte	Materia orgánica	C/N	Carbonatos	pH	CIC	V	Fe ₂ O ₃ libre (%)	Fe ₂ O ₃ total (%)
Ah1	8.8	31.9	0.0	5.5	13.6	50.0	0.16	0.74
Ah2	2.6	30.2	0.0	5.6	5.2	59.6	0.05	0.59
AC	0.6	11.7	0.0	6.1	1.5	60.0	0.01	0.13
C1	0.4	11.5	0.0	7.1	1.0	60.0	0.01	0.11
C1g	0.3	8.5	0.0	7.9	1.0	100	0.08	0.26
C2	0.3	8.5	0.0	8.1	1.0	100	0.03	0.15



Figura 13. Zona inundable de la Laguna de Santa Olalla (Parque Nacional de Doñana). Antonio Jordán/Imaggeo.



Figura 14. Laguna de Santa Olalla (Parque Nacional de Doñana). Antonio Jordán/Imaggeo.

Perfil 1-8. Solonchak endosódico

En general, son suelos que ocupan áreas muy extensas en zonas planas, asociadas a la marisma, con un desarrollo del perfil muy bajo, de matriz arcillosa o arcillolimosa y fuertemente afectados por presencia de sales, a veces incluso aflorando a la superficie.



Figura 15. Perfil 1-8 (Solonchak endosódico; izquierda) y entorno (alto de dunas en el área de Naves, Parque Nacional de Doñana; derecha). Antonio Jordán/Imaggeo.

Tabla 25. Perfil 1-8; entorno.

Nombre del perfil	Solonchak endosódico (WRB)
Localización	Parque Nacional de Doñana Salinas
Coordenadas	36.87294,-6.37302
Observadores	Nicolás Bellinfante, Antonio Jordán, Lorena M. Zavala (MED_Soil Research Group, Universidad de Sevilla)
Pendiente	0 – 2%
Relieve	Llano
Erosión	Nula
Drenaje superficial	Muy deficiente
Posición topográfica	Llanura
Material original	Arcillas y limos
Vegetación	Vegetación herbácea

Tabla 26. Perfil 1-8; datos morfológicos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Az	0 – 15	5Y 6/2 (s), gris oliva claro, y 5Y 4/2 (h), gris oliva oscuro; textura arcillosa limosa; estructura poliédrica angular, gruesa, fuertemente desarrollada; duro en seco, muy friable en húmedo, adherente y muy plástico en mojado; sin poros; sin raíces; reacción calcárea fuerte; sin nódulos; límite neto plano.
Ckz	> 15	2.5Y 6/2 (s), gris parduzco claro, y 2.5Y 5/3 (h), pardo oliva claro; textura arcillosa limosa; estructura masiva; duro en seco, friable en húmedo, adherente y muy plástico en mojado; sin poros; sin raíces; reacción calcárea fuerte; sin nódulos.

Tabla 27. Perfil 1-8; Grava (%), fracciones texturales (%), clasificación de la textura, densidad aparente (DA; g cm⁻³) capacidad de retención hídrica del suelo (RH a 0, 33 y 1500 kPa; %).

Horizonte	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	DA	RH (0 kPa)	RH (33 kPa)	RH (1500 kPa)
Az	0.0	8.2	45.3	46.5	Arcillolimoso	1.25	53.9	43.0	26.8
Ckz	0.0	0	41.3	58.7	Arcillolimoso	0.81	55.8	49.9	35.1

Tabla 28. Perfil 1-8; acidez (en H₂O y KCl), salinidad (CE, dS m⁻¹), carbonatos (%), carbono orgánico (%) y nitrógeno Kjeldahl (%).

Horizonte	pH (H ₂ O, 1:2.5)	pH (KCl, 1:2.5)	CE (1:5)	Carbonatos	C orgánico	N Kjeldahl
Az	8.0	7.7	3.55	20.4	1.63	0.17
Ckz	8.2	7.6	4.20	21.8	5.10	0.04

Tabla 29. Perfil 1-8; P-Olsen (mg kg⁻¹) y oligoelementos asimilables (Fe, Mn, Cu y Zn; mg kg⁻¹).

Horizonte	P-Olsen	Fe	Mn	Cu	Zn
Az	15.1	0.0893	0.05620	0.0086	0.0000
Ckz	16.3	0.0316	0.0081	0.0025	0.0045

Tabla 30. Perfil 1-8; cationes de cambio (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺, cmol (+) kg⁻¹), capacidad de intercambio catiónico (CIC, cmol (+) kg⁻¹) y saturación del complejo de cambio (V, %).

Horizonte	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CIC	V
Az	5.686	8.333	3.179	20.609	37.807	100.00
Ckz	22.784	8.833	3.256	35.304	70.177	100.00

Ruta 2: Aznalcóllar. Sus suelos, 20 años después

Introducción

En la primavera de 1998 se produjo uno de los mayores accidentes mineros ocurridos hasta la fecha en Europa. La rotura de la balsa de decantación de la mina de 'Los Frailes' (complejo minero de Aznalcóllar) ocasionó el vertido de cerca de 6 millones de m³ de aguas ácidas y lodos mineros (muy ricos en elementos traza) a los ríos Agrio y Guadiamar, inundando más de 2000 ha de tierras fértiles. Inmediatamente después comenzó uno de los mayores programas de recuperación y limpieza de aguas y suelos emprendidos hasta la fecha, que culminó en 2003 con la declaración de la zona afectada como Paisaje Protegido del Corredor Verde del Guadiamar. A pesar de este programa de restauración, resultó imposible la completa retirada de los lodos depositados en los suelos, habiéndose constatado en numerosas ocasiones la existencia de una contaminación residual por elementos traza que todavía perdura en ciertas zonas del Corredor Verde.

En esta visita discutiremos algunos de los aspectos relacionados con el impacto de las actividades mineras en los suelos de la cuenca del Guadiamar, así como con las tareas de restauración acometidas y los resultados de diferentes proyectos de investigación que han tenido al Corredor Verde como zona de estudio.

Descripción general de la Cuenca del Río Guadiamar

El río Guadiamar es el último afluente del río Guadalquivir por su margen derecha, con nacimiento en la Sierra de los Gallos (Sierra Morena). La cuenca del Guadiamar abarca unos 1300 km² entre las provincias de Sevilla y Huelva y constituye el sistema de conexión natural entre Sierra Morena y los ecosistemas de Doñana (Figura 16). Hasta hace poco tiempo era el principal subsistema hidrológico que inundaba las marismas de Doñana, y aún constituye uno de los complejos fluviales apenas sin regular del sistema hidrográfico andaluz. La zona hoy conocida como el Corredor Verde del Guadiamar comprende nueve municipios de la provincia de Sevilla (Figura 16), y está integrada en la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA) bajo la figura de Paisaje Protegido. La cuenca queda encuadrada dentro del ámbito mediterráneo subhúmedo de rasgos oceánicos, caracterizado por la presencia de inviernos suaves y relativamente lluviosos, y períodos estivales secos muy marcados. Las temperaturas medias fluctúan entre 9 en enero y 27 °C de julio, y las precipitaciones anuales entre 555 mm (Sanlúcar la Mayor) y 663 mm (Castillo de las Guardas; Borja et al., 2001).

El tramo alto de la cuenca se asocia a la Unidad Occidental o Surportuguesa-Onubense de la Sierra Morena, donde abundan las pizarras del Paleozoico. En esta zona los suelos son principalmente inceptisoles. El tramo medio se emplaza tanto sobre los materiales de la margen sur o depresión periférica del Macizo Hespérico, donde predominan calizas de borde, margas y arenas del Neógeno, como sobre los materiales del Cuaternario asociados a la evolución fluvial. Estos últimos están representados por las facies detríticas gruesas de las terrazas fluviales y las finas de la llanura aluvial del Guadiamar. El río discurre adosado al macizo mio-plioceno del Aljarafe por su margen izquierda. En el tramo bajo (sector de Entremuros), predominan los materiales finos de ambientes marismesños compuestos por arcillas y limos del Holoceno reciente (Borja et al., 2001).



Figura 16. Ubicación de Corredor Verde del Guadamar en el oeste de Andalucía (autora: M^a del Mar Montiel Rozas).

Los suelos del Corredor Verde

En esta excursión visitaremos el tramo medio de la cuenca del Guadamar, afectado por el vertido minero de Aznalcóllar. Según el trabajo realizado por Clemente et al. (2000) en este tramo medio pueden encontrarse distintas unidades edáficas: 1) Asociación Typic Xerofluvents/Aquic Xerofluvents en la llanura aluvial, entre el primer nivel de terrazas y el pie de monte del macizo del Aljarafe, con sedimentos aluviales de naturaleza caliza y textura que varía de francoarenosa a francoarcillosa; 2) Asociación Typic Haploxeralfs/Aquic Haploxeralfs, en las terrazas de la margen derecha. Estos suelos más evolucionados presentan un horizonte argílico, lavado de carbonatos en profundidad y texturas empobrecidas en materiales finos. En las partes más bajas aparecen fenómenos de hidromorfía que originan la aparición de manchas y nódulos ferruginosos; 3) Calcixerollic Xerochrepts, en el contacto del aluvial con el primer nivel de terrazas, originado por la erosión de las terrazas y que coincide con un frente de descalcificación de los suelos superiores, 4) Typic Rhodoxeralfs, suelos mucho menos abundantes y limitados a los niveles más altos de terraza, caracterizados por niveles muy bajos de carbonatos y un horizonte argílico empobrecido y una coloración rojiza intensa.

El accidente minero de Aznalcóllar: contaminación de suelos

En la madrugada del 25 de abril de 1998, el dique se desplazó unos 60 m, dejando abierta una brecha de unos 50 m, por la que se vertieron unos 2 hm³ de lodos y 3-4 hm³ de aguas ácidas a los cauces de los ríos Agrio y Guadamar (Figura 17). Esta mezcla de lodos y aguas ácidas, muy rica en metales pesados y metaloides, como el As, se desplazó a lo largo de unos 60 km, desde la balsa hasta la zona conocida como 'Entremuros', en el límite del Parque Nacional de Doñana. La construcción de tres muros de contención en esta zona ('Entremuros') impidió que la contaminación se extendiese al Parque y llegara directamente al río Guadalquivir, contaminando su estuario. La balsa (cuya construcción se inició en los años 60), antes de ser utilizada por la

explotación de la 'Corta de los Frailes', fue utilizada durante 16 años por la mina de Aznalcóllar ('Corta de Aznalcóllar', 1979-1995), período en el que se trataron unos 43 millones de toneladas de sulfuros polimetálicos. En el interior de la balsa permanecieron unos 20 millones de m³ de residuos mineros que no fueron arrastrados por las aguas tras la rotura del dique, que finalmente pudieron ser contenidos y sellados definitivamente.

Parte de los lodos se depositaron en el cauce (985.497 m³, aproximadamente), y parte sobre los suelos de las márgenes de ambos ríos (996.347 m³), con una anchura de unos 300 - 400 m a cada lado. El espesor de la capa depositada estuvo en función de la distancia a la balsa y de la elevación con respecto al nivel del río, oscilando entre unos 2 cm y más de 3 m. El espesor más frecuente fue de 2 a 5 cm (López- Pamo et al., 1999). Fueron afectadas en total unas 4286.4 ha, de las cuales unas 2710 fueron cubiertas por lodos y el resto afectadas por las aguas ácidas. Comprendían, en su mayoría, zonas agrícolas y pastizales (Figura 17).



Figura 17. Imagen aérea del vertido de Aznalcóllar (izquierda) y detalle de un suelo cubierto por los lodos mineros, en abril de 1998 (derecha).

Las consecuencias ecológicas del accidente fueron catastróficas. En los primeros días se produjo la desaparición de la fauna acuática del río Guadiamar: se retiraron unas 37 toneladas de peces muertos y 40 de anfibios, así como 20 de pájaros y algunos mamíferos. Los primeros análisis de suelos realizados, retirando previamente la capa de lodos, revelaron que los suelos fueron contaminados fundamentalmente por As, Au, Bi, Cd, Cu, Pb, Sb, Tl and Zn (Cabrera et al., 1999), ya que las concentraciones medias de estos elementos superaban las de los suelos no contaminados del área de estudio (valores de referencia). Cu, Zn y Cd penetraron en el suelo principalmente con las aguas ácidas, mientras que el resto lo hizo fundamentalmente con la fase sólida del vertido. Cadmio y Zn fueron considerados como los elementos de mayor movilidad; el Cu tendría una movilidad media, especialmente en medio ácido, y muy baja la de elementos como As, Bi, Pb y Tl. La profundidad alcanzada por distintos metales y metaloides en los suelos afectados no fue más allá de los primeros 10-20 cm (Simón et al., 1999) aunque se llegó a 50-80 cm en los suelos de carácter más arenoso.

La evolución de la contaminación de los suelos ha sido variable dependiendo de la zona. En un muestreo sistemático realizado a lo largo de toda la cuenca de los ríos Agrio y Guadiamar realizado en 2014 (Domínguez et al. 2016) se observó que en el tramo norte es posible encontrar

concentraciones de S muy altas en los taludes del río, con un máximo puntual de casi 9 %. La mayor acidez del tramo norte ocasiona concentraciones solubles de elementos traza extremadamente altas, hasta (mg kg^{-1}) 7122 de S, 1623 de Al, 0.87 de Cd, 34.8 de Pb, concentraciones que posiblemente no son toleradas por la mayoría de las plantas. En el tramo sur, sin embargo, así como en la llanura aluvial de toda la zona muestreada, las concentraciones de elementos traza fueron mucho menores (hasta dos órdenes de magnitud en muchas ocasiones), y en general los contaminantes se encuentran mucho más estabilizados debido al mayor contenido en carbonatos y arcilla de los suelos de este tramo sur. Esta mayor estabilización de la contaminación en la llanura aluvial también está indicada por una baja transferencia de elementos traza, por lo general, de los suelos a las especies leñosas que se desarrollan en la zona (Domínguez et al., 2018).

La restauración ambiental de la cuenca del Guadiamar

Los trabajos de retirada de lodos se desarrollaron en dos fases; la primera consistió en la retirada de lodos propiamente dicha (con un coste de 43.311.886 €), mientras que la segunda, más específica, tuvo lugar en zonas donde se detectaron problemas puntuales, en los que se efectuó una segunda limpieza, además de la adición de enmiendas (con un coste de 14.518.694 €). Los lodos fueron depositados en la antigua corta de la mina de Aznalcóllar, propiedad de Boliden-Apirsa. Durante la segunda fase se realizó la aplicación de enmiendas, orgánicas e inorgánicas, tanto para la neutralización e inmovilización de la contaminación residual (elementos traza), como para la recuperación, en lo posible, de la fertilidad de los suelos (pérdidas de materia orgánica y nutrientes tras la retirada de la capa arable). Concretamente, se llevaron a cabo adiciones de CaCO_3 y espuma de azucarera para corregir la acidez y estabilizar los metales pesados, hidróxidos de hierro para la estabilización del arsénico y materia orgánica de diversa naturaleza para mejorar la fertilidad del suelo (Cabrera et al. 2008). En total se retiraron en total unos siete millones de m^3 de lodos y tierras contaminadas.

Tras la limpieza de suelos comenzaron las actividades de restauración ecológica en 1999 que dieron lugar al establecimiento del Corredor Verde del Guadiamar. Por un lado, se actuó sobre la marisma de Entremuros, muy afectada por la contención de la riada, y por otro sobre toda la llanura aluvial de los ríos Agrio y Guadiamar, reforestándose también un pequeño tramo que no fue afectado, más al norte, todavía en las inmediaciones de la mina. La administración autonómica impulsó la restauración de las cuencas de los ríos Agrio y Guadiamar para convertirlas en un Corredor Ecológico, y el Ministerio de Medio Ambiente puso en marcha un Proyecto para recuperar la funcionalidad hidrológica de las cuencas vertientes a las marismas del Parque Nacional, denominado Doñana 2005.

La restauración se centró en la recuperación del sistema fluvial, por un lado (eliminación de barreras y haciendo operativos muchos de los antiguos brazos obstruidos o transformados por actividades agrícolas) y en la de los hábitats naturales y paisajes de ribera. Para la reforestación de los suelos se diseñaron distintos marcos de plantación, teniendo en cuenta, a gran escala, la heterogeneidad de la zona afectada (Figura 18). Estos marcos se englobaron en tres grupos: bosque de ribera, bosque mediterráneo (implantado en las terrazas aluviales) y vegetación de transición hacia la marisma, con un total de siete marcos de plantación distintos. En total, se emplearon 26 especies leñosas autóctonas. Las especies de árboles más abundantes fueron la encina (*Quercus ilex* subsp. *ballota*), el acebuche (*Olea europaea* var. *sylvestris*) y el algarrobo (*Ceratonia siliqua*), en las zonas más alejadas del río, y el álamo blanco (*Populus alba*), el sauce (*Salix atrocinerea*) y el fresno (*Fraxinus angustifolia*) en las riberas del Guadiamar. Hacia las



Figura 18. Vista de una de las zonas reforestadas en el Corredor Verde (entorno de puente de las Doblas), en 2015. Teodoro Marañón (IRNAS-CSIC).

marismas el taraje (*Tamarix africana*) fue muy utilizado. La densidad de plantación estuvo comprendida entre 700 y 900 plantas por ha, lo que supuso un total de casi 3.5 millones de plantones en una primera fase (la inversión realizada para la restauración ecológica fue de 22.022.461 €).

Itinerario

Parada 1: Mina de Aznalcóllar-Minera los Frailes

La historia minera andaluza cuenta con una trayectoria de más de 6,000 años, pues la extracción de cobre y otros metales en la zona se registra desde el cuarto milenio a.C. Actualmente, la minería metálica se concentra en el sector occidental, entre las provincias de Sevilla y Huelva, por donde discurre la Faja Pirítica Ibérica, la mayor reserva europea de sulfuros polimetálicos. Esta franja ocupa 250 km de largo y 40-60 km de ancho, que se prolonga desde el sur de Lisboa hasta las inmediaciones de Sevilla.

El complejo minero de Aznalcóllar, de casi 950 hectáreas de superficie, se sitúa en el extremo este de la Faja Pirítica Ibérica, y se estima que presenta reservas de aproximadamente 80 millones de toneladas de sulfuros polimetálicos (cobre, plomo y zinc, además de oro y plata). Las dos cortas que lo conforman, Aznalcóllar y Los Frailes, fueron explotadas parcialmente mediante métodos de minado superficial entre 1975 y 2001. En el momento del accidente de 1998 La balsa (cuya construcción se inició en los años 60), era utilizada por la explotación de la 'Corta de los Frailes', propiedad de Boliden-Apirsa. Previamente fue utilizada durante 16 años por la mina de Aznalcóllar ('Corta de Aznalcóllar', 1979-1995), período en el que se trataron unos 43 millones de toneladas de sulfuros polimetálicos.

Con el objetivo de reactivar la industria minera en la zona para, en parte, paliar la crisis económica y social creada en los municipios cercanos tras el accidente, la Junta de Andalucía a principios de 2014 lanzó un concurso público internacional para la reapertura de la mina. El consorcio Grupo México-Minorbis resultó adjudicatario de los derechos mineros para la exploración y explotación del complejo de Aznalcóllar durante los próximos 30 años. Actualmente el proceso se encuentra en fase de exploración, que servirá para confirmar los datos de las reservas y realizar diversas pruebas metalúrgicas. Durante la fase de explotación la extracción del mineral no se efectuará a cielo abierto, como en el pasado, sino que se

desarrollará totalmente en interior. La explotación se realizará de abajo hacia arriba, es decir, comenzará en el nivel más profundo de la mina e irá subiendo a superficie. Se empleará un método conocido como longhole stoping o corte y relleno que consiste en extraer el mineral a través de grandes cámaras, de 20 metros de ancho por 30 metros de altura y longitud variable, que se trabajarán en dos niveles, uno de perforación y otro de extracción. Una vez explotada, la cámara se rellenará con pasta cementada, que se obtendrá de los materiales estériles que resulten de la extracción.

Parada 2. Corredor Verde del Guadiamar: Finca experimental el Vicario

En esta parada visitaremos dos parcelas experimentales de la finca “El Vicario” situada en el margen derecho del río Guadiamar, a 10 km de la mina de Aznalcóllar. En esta finca los trabajos de recuperación consistieron únicamente en la eliminación de los lodos y de la capa superficial de suelo (0-10 cm). Actualmente los proyectos de investigación en marcha están gestionados por investigadores del IRNAS-CSIC. El suelo de esta finca se clasifica como Typic Xerofluven, con una textura de 21.1% arcilla, 29.1% limo and 49.8% arena.

Experimento de adición de enmiendas

El experimento comenzó en 2002 dividiendo el área experimental en subparcelas (7 m x 8 m) donde se aplicaron diferentes tratamientos con enmiendas. Las enmiendas utilizadas fueron espuma de azucarera (EA), compost de biosólidos (CB) y leonardita (LE). La espuma de azucarera es un residuo de la industria azucarera, con entre un 70- 80 % de CaCO_3 , un pH en torno a 9 y un contenido en C orgánico alrededor del 6.7 %. El compost de biosólidos usado procedió de una estación depuradora de aguas residuales, y presentó un pH en torno a 7, con un contenido en C de 19.5 %. La leonardita empleada tuvo un pH de 6 y un contenido en C de 29 %. Las parcelas enmendadas se subdividieron en función de la dosis de enmienda aplicada. A una parte se le aplicó la enmienda durante 4 años (2002, 2003, 2005 y 2006), mientras que a la otra mitad solo durante dos años consecutivos (2002 y 2003). Las dosis añadidas fueron: 30 Mg ha^{-1} de CB, 25 Mg ha^{-1} de LE mezclada con 10 Mg ha^{-1} de EA y 30 Mg ha^{-1} de EA. Una descripción más detallada del diseño experimental y del seguimiento realizado a lo largo de todos estos años se encuentran recogidos en los trabajos de Madejón et al. (2009, 2010, 2018).

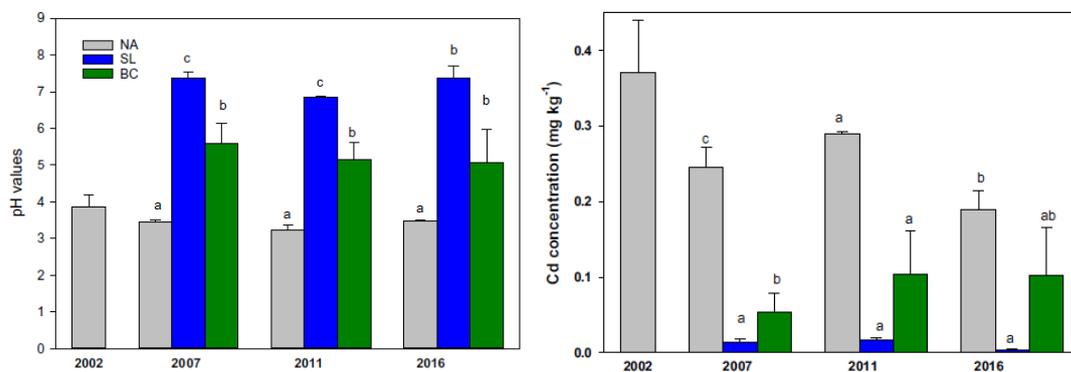


Figura 19. Evolución del pH y las concentraciones disponibles de Cd (extraídas con CaCl_2) en el experimento de enmiendas (Madejón et al., 2018).

El seguimiento de la evolución de las propiedades de los suelos durante estos años ha demostrado que la adición de estas enmiendas tiene un efecto duradero en el pH del suelo y la movilidad de los elementos traza más móviles, como Cd (Figura 19). El pH, factor determinante en la disponibilidad de la mayoría de los elementos traza que contaminan estos suelos, aumentó con la adición de enmiendas, especialmente con la EA, lo cual provoca una reducción en las concentraciones de metales disponibles para las plantas y propicia una mayor actividad de microorganismos en el suelo. Estas concentraciones disponibles disminuyeron incluso en el tratamiento control, demostrando un proceso de atenuación natural de la contaminación con el tiempo. Durante estos años se han realizado también varios estudios sobre la evolución de las comunidades microbianas en estos suelos (Montiel-Rozas et al., 2018).

Experimentos de fitorecuperación de suelos contaminados

En una parcela adyacente se han desarrollado otros proyectos que incluyen el uso de plantas para la mejora de la calidad del suelo. En uno de ellos se evaluó la viabilidad del uso combinado de enmiendas y especies de crecimiento rápido para la gestión de estos suelos altamente degradados (proyecto BIORESMED). Las especies evaluadas fueron tipo cardo (*Silybum marianum* y *Cynara cardunculus*), que tienen un potencial interés como cultivos energéticos para zonas degradadas, dado su alto poder calorífico y sus bajos requerimientos de agua y nutrientes. Los resultados de este proyecto indican que *Cynara cardunculus* presenta una mayor sensibilidad a la contaminación del suelo que *Silybum marianum*, y que el principal impedimento para el establecimiento de estos suelos son las deficientes condiciones físicas de estos suelos tan alterados (Domínguez et al., 2017; Madejón et al., 2018).

En un proyecto en curso (INTARSU) se han realizado plantaciones de *Olea europea* y *Pinus pinea* para conocer la respuesta de las plantas (en sus primeros años de desarrollo) y las comunidades microbianas a la contaminación del suelo, así como para analizar los procesos de retroalimentación (feedback) entre árbol–suelo–microbios.

Parada 3: Restauración de una gravera (área recreativa Las Doblas)

Las graveras de zona de las Doblas, antes de la restauración ambiental llevada a cabo en el Corredor Verde del Guadiamar, era uno de los enclaves más degradados de este río. Primero fue explotada como gravera para la extracción de áridos y, tras su abandono, como vertedero incontrolado de escombros. En esta zona, dada su morfología particular, se acumularon hasta 4 metros de espesor de lodos, por el efecto tapón del puente de la carretera, así como abundantes aguas ácidas, retenidas en los huecos de la antigua explotación de áridos. Por ello esta zona tuvo que ser objeto de un tratamiento específico durante las tareas de limpieza.

Entre las actuaciones llevadas a cabo se realizaron importantes obras de limpieza general y retirada de escombros, así como de adecuación de la topografía de las áreas de extracción para que se propiciara el establecimiento de la vegetación. Dentro de las actuaciones de acondicionamiento se reforzaron los taludes y, para favorecer una mayor estabilidad y desarrollo vegetal de las márgenes, se procedió a la suavización, estableciendo como perfil tipo una pendiente de 45°. Los taludes se reforzaron mediante la instalación de una empalizada de madera recubierta de fibra vegetal (malla de coco). Se construyeron aliviaderos para mantener la entrada de agua desde el río en condiciones de seguridad, de manera que en el muro exterior de las graveras se acondicionó un punto de entrada y otro de salida situado en el extremo sur.



Figura 20. Vista de la laguna de Las Doblas (antigua gravera). Arenas et al. (2008).



Figura 21. Vista de la laguna de Las Doblas (antigua gravera). Antonio Jordán/Imaggeo.

Finalmente plantación de figumárgenes con especies propias de ribera: álamos, sauces, fresnos, tarajes, adelfas y otras. En las zonas más altas se plantaron especies de árboles mediterráneas tanto de porte pequeño como de mediano tamaño. La recuperación de la cubierta vegetal ha propiciado que la laguna artificial sea muy utilizada por la fauna, de manera que las aves la recolonizaron de manera notable en pocos años (Figura 20).

En esta parada también se comentarán distintos aspectos relacionados en el éxito de las reforestaciones en la zona, y la dinámica de los elementos traza en el sistema suelo-planta de las especies leñosas.

Parada 4: Centro de Visitantes del Corredor Verde del Guadiamar (Aznalcázar)

En el centro de visitantes se ofrece información sobre la evolución de este paisaje protegido, pudiéndose visitar una exposición permanente sobre el desastre de Aznalcóllar. Desde aquí se puede visitar el cercano itinerario botánico y área recreativa de Buitrago. Actualmente es gestionado por la empresa Guadiamar Educa, que desarrolla en la zona diferentes actividades de turismo activo y educación ambiental.

El almuerzo tendrá lugar en este centro.

Parada 5: Parcela testigo de lodos (Vado del Quema)

Se propone la visita opcional después del almuerzo a la parcela testigo del Vado del Quema, que ha permanecido cubierta por los lodos sin que se haya retirado el suelo contaminado ni se hayan añadido enmiendas (Figura 22).

Al largo de estos años distintos estudios se han realizado en esta parcela, para conocer cuál hubiera sido la evolución de la contaminación del suelo si no hubiera retirado el lodo ni se hubiera realizado ninguna acción de recuperación. Los trabajos de Álvarez-Ayuso et al. (2008), García et al. (2009) y Burgos et al. (2013) pusieron de manifiesto un progresivo lixiviado de los elementos traza más solubles en estos suelos, con el consiguiente peligro de contaminación de acuíferos, algunos muy próximos al Parque Nacional de Doñana. En estos trabajos se observó una fuerte acidificación superficial (pH cercano a 2 en los primeros 15 mm) y total disolución de los carbonatos en los primeros centímetros (García et al., 2009).

Siete años después del accidente Álvarez- Ayuso et al. (2008) detectaron todavía una fuerte acidificación superficial (pH 2.72) y cambios en la composición mineral del suelo bajo la capa de lodos (aparición de jarosita, hidrosióxidos de Fe y yeso, principalmente, con la desaparición total de calcita).



Figura 22. Parcela testigo de lodos en el Vado del Quema. Antonio Jordán/Imaggeo.

Con el tiempo, 12 años después del accidente, la máxima acidificación ya se registró a mayor profundidad (10-20 cm, pH 3.07), consecuencia del lixiviado de acidez y sulfatos generados en superficie (Burgos et al., 2013). Esta parcela está siendo progresivamente colonizada por la vegetación. La capacidad natural de recuperación de los suelos afectados se ha evidenciado también mediante el seguimiento de la acumulación de elementos traza en las herbáceas que han colonizado la parcela (Burgos et al., 2013).

Ruta 3. Suelos de la campiña sevillana

Origen geológico y litología

La Depresión Bética o del Guadalquivir, ocupa el área geológica más extensa de la provincia de Sevilla. Geológicamente, se formó como una depresión posterior a la orogenia alpina (Mioceno medio) (Figura 23).

El área subsidente se rellenó posteriormente con sedimentos del Mioceno superior, Plioceno y, más localmente, Pleistoceno, a causa de la erosión de los nuevos relieves. La cuenca formada se superpone al surco frontal que existiría al norte de la cordillera a la vez que se iba formando (Bellinfante et al., 2007). Tiene una marcada asimetría ya que el borde norte (macizo Hercínico) es tectónicamente inactivo mientras que el borde sur sería activo, lo que trae como consecuencia que junto a este borde activo se depositasen importantes volúmenes de olistostromas formados por masas (olistolitos) de procedencia bética en el seno de materiales del Mioceno. La mitad norte de la depresión del Guadalquivir corresponde a afloramientos del Mioceno superior y Plioceno sin olistostromas. El proceso de relleno del curso bajo (marismas del Guadalquivir) aún no ha concluido. Los principales sustratos litológicos son materiales de relleno aluviales, asociados a calizas detríticas, calizas bioclásticas y conglomerados (Figura 24).

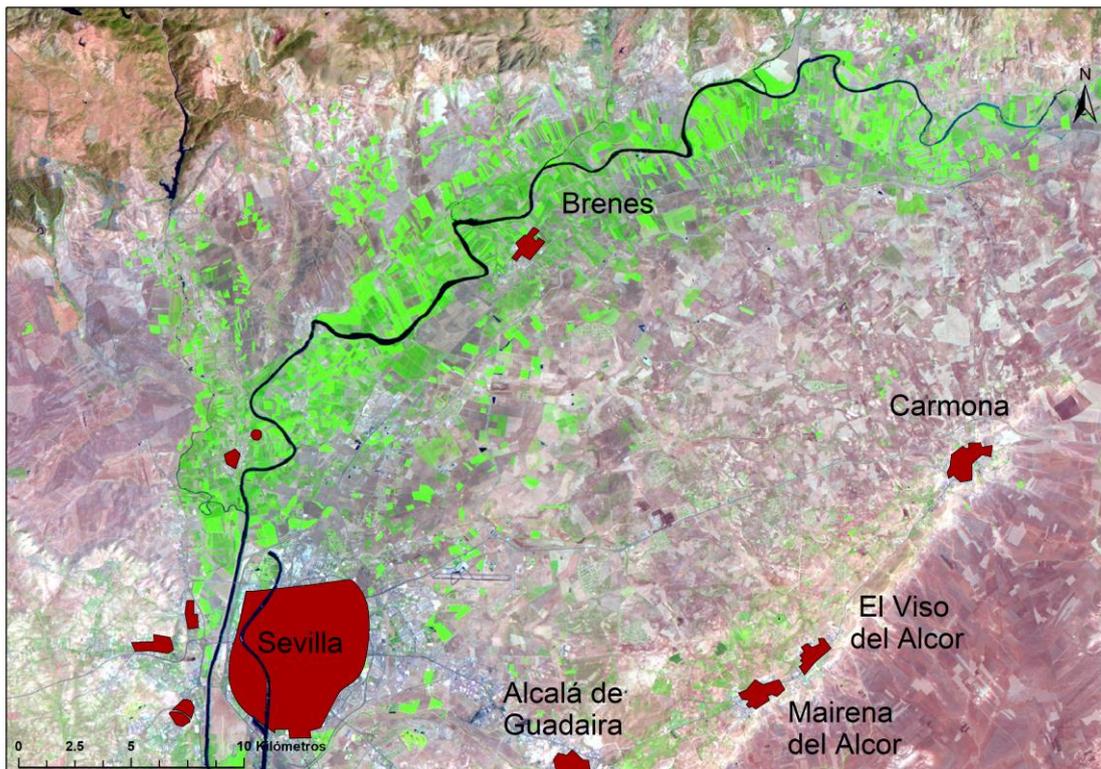


Figura 23. Imagen Landsat del área de estudio.

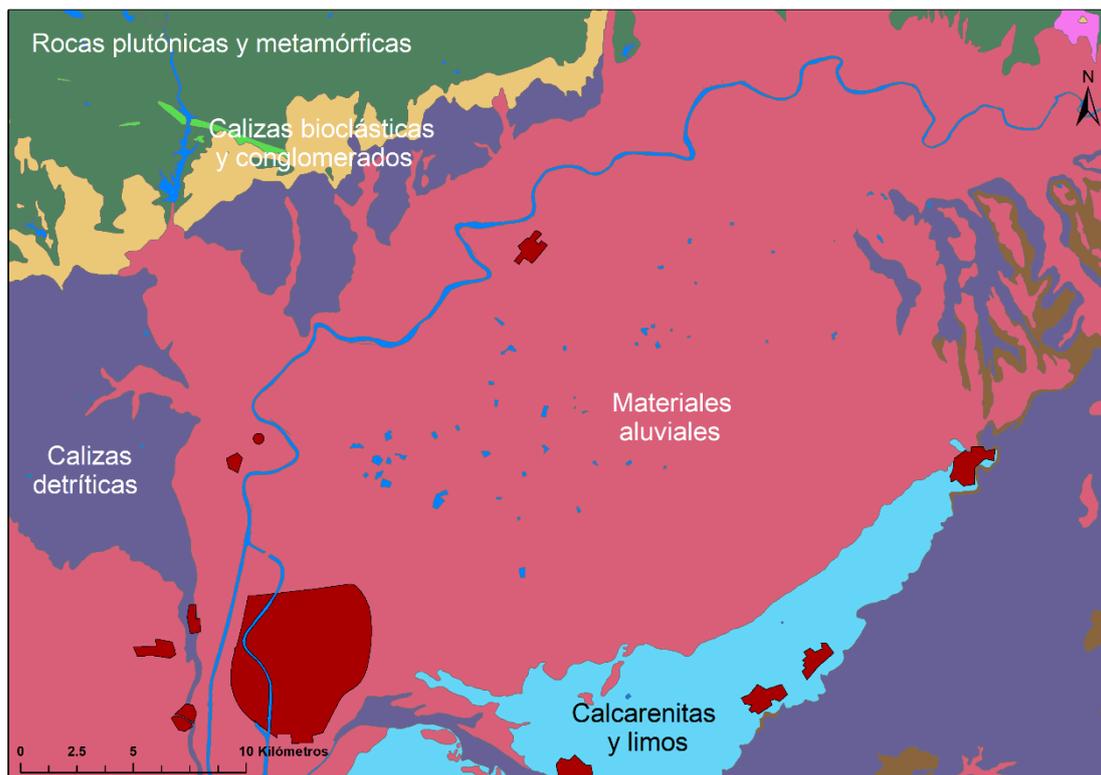


Figura 24. Mapa litológico de la campiña de Sevilla (Bellinfante et al., 2007).

La depresión del Guadalquivir se corresponde con la gran llanura que rodea al valle del río Guadalquivir, que se ensancha ampliamente hacia el oeste (marismas) y se estrecha hacia el este hasta terminar en las lomas de Úbeda en las faldas de la sierra de Cazorla; su altitud media al oeste de Córdoba es inferior a 200 m, mientras que en su extremo oriental es de unos 400 m (Bellinfante et al., 2007). En la llanura aluvial que rodea al valle central predomina un relieve suave de cerros y colinas, que responde a la acción directa de las aguas superficiales sobre materiales blandos y deleznable (margas, calizas y arcillas), como consecuencia de la morfogénesis denudativa o estructural denudativa. Mientras tanto, el valle propiamente dicho se caracteriza por su carácter plano, con predominio de materiales sedimentarios como arenas, limos y arcillas, frecuentemente acompañados de cantos y gravas (lo que es más común en las zonas más próximas a los cursos fluviales). Otros sustratos relativamente frecuentes en la zona son calizas, conglomerados, lutitas y, más al sur, margas yesíferas.

Clima

El clima es suave, con inviernos frescos y veranos muy cálidos. Según la estación meteorológica Sevilla-Aeropuerto (Figura 25), la temperatura media mensual oscila entre 10.7 (enero) y 26.8 °C (agosto), con un valor medio anual de 18.2 °C. La precipitación media mensual oscila entre 2.3 (julio) y 101.7 mm (noviembre), con un valor medio anual de 606.9 mm. La evapotranspiración potencial media mensual oscila entre 19.8 (enero) y 118.6 mm (julio), con un valor medio anual de 733.9 mm (muy superior a la precipitación media anual). Como consecuencia, el balance hídrico anual es negativo (-127.0 mm). El período de balance hídrico negativo abarca normalmente desde mayo a octubre.

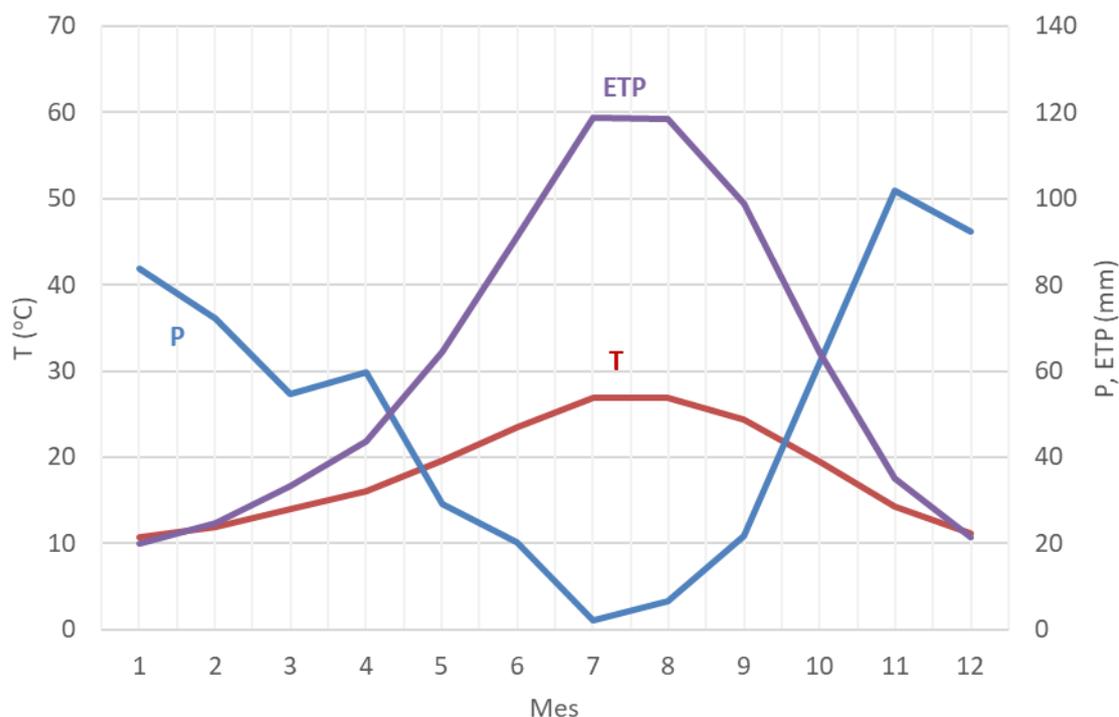


Figura 25. Diagrama ombroclimático de la estación Sevilla-Aeropuerto (código 5783). T, temperatura (°C); P, precipitación (mm); ETP, evapotranspiración potencial (mm).

Suelos

Breve historia del estudio de suelos en la zona

Los primeros inventarios de suelos de la zona de estudio, se remontan a los años 60 del pasado siglo, con la realización del Mapa de Suelos de España, a escala 1: 1000000, que se actualizó con la aplicación del sistema de clasificación de la FAO, para su publicación en el Mapa de Suelos de Europa. También se realizaron algunos trabajos cartográficos de síntesis a escala regional que incluían el área de estudio (CEBAC, 1962; CEBAC, 1971; CSIC-IARA, 1989; INIA, 1975).

El catálogo de Suelos de Andalucía (De la Rosa, 1984) constituyó una primera aproximación a la realización de una base de datos sobre suelos en Andalucía, que sirvió como referencia para trabajos cartográficos posteriores (De la Rosa y Moreira, 1987; CSIC-IARA, 1989).

En 1989, CSIC-IARA editó el mapa de suelos de Andalucía a escala 1:400.000. Se trata de una obra que compila la información generada durante más de 30 años por el CEBAC y la Estación Experimental del Zaidín. El mapa presenta una visión de conjunto de la distribución espacial de las asociaciones y complejos de suelos definidos a escala regional en Andalucía. Según este trabajo, el origen litológico de los suelos de la Depresión del Guadalquivir es de muy diversos materiales detríticos y calcáreos. Son suelos por lo general agrícolas, generalmente calcáreos y profundos. Existen zonas localizadas de suelos arenosos y suelos salinos, con Fluvisoles, Vertisoles, Cambisoles y Planosoles como suelos dominantes.

Más recientemente, Bellinfante et al. (2007) realizaron el análisis y cartografía de unidades geomorfoedáficas de la zona de estudio a escala 1:50.000 (Figura 26).

Itinerario

Parada 1. Perfil 3-1. Suelos vérticos en el Cortijo el Tomejil (IFAPA), Carmona



Figura 27. Perfil 3-1 (Vertisol cálcico gléyico; izquierda) y entorno (Cortijo de Tomejil, Carmona, Sevilla; derecha).
Antonio Jordán/Imageo.

Tabla 31. Perfil 3-1; entorno.

Clasificación	Vertisol cálcico gléyico (WRB)
Observadores	Nicolás Bellinfante, Antonio Jordán, Lorena M. Zavala (MED_Soil Research Group, Universidad de Sevilla)
Localización	Cortijo de Tomejil, Carmona, Sevilla Aproximadamente 9 km al sur de Carmona (carretera de Carmona a El Arahál)
Coordenadas	37.39928, -5.592213
Elevación	76 msnm
Pendiente	0-3%
Relieve	Llano
Drenaje superficial	Muy deficiente a deficiente
Posición topográfica	Llanura
Material original	Arcillas grises (esmeclitas), Cuaternario
Vegetación/uso	Cultivos herbáceos

Tabla 32. Perfil 3-1; datos morfológicos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0 – 25	2.5Y 4/2 (s), pardo grisáceo oscuro, 2.5Y 3/2 (h), pardo grisáceo muy oscuro; textura francoarcillosa; estructura granular fina a media en superficie (algunos milímetros) y poliédrica subangular gruesa; fuertemente desarrollada; muy duro en seco; firme en húmedo; muy adherente y muy plástico en mojado; no cementado; sin piedras; poros escasos y gruesos, pero con grietas de origen vértico en la estación seca; raíces escasas y finas; reacción calcárea fuerte; nódulos calcáreos escasos; límite neto plano.
Bwk	25 – 60	2.5Y 5/2 (s), pardo grisáceo muy oscuro, 2.5Y 3/2 (h), pardo grisáceo muy oscuro; textura arcillosa; estructura prismática media a gruesa; fuertemente desarrollada; muy duro en seco; firme en húmedo; muy adherente y muy plástico en mojado; no cementado; sin piedras; poros escasos y finos, pero con grietas de origen

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
		vértico en la estación seca; sin raíces; reacción calcárea fuerte; nódulos calcáreos escasos; cutanes de presión abundantes en la estación seca; límite neto plano.
C	> 60	2.5Y 4/2 (s), pardo grisáceo oscuro, 2.5Y 3/2 (h), pardo grisáceo muy oscuro; rasgos redoximórficos; textura arcillosa; estructura poliédrica subangular gruesa a muy gruesa; fuertemente desarrollada; muy duro en seco; firme en húmedo; muy adherente y muy plástico en mojado; no cementado; sin piedras; poros escasos y finos; sin raíces; reacción calcárea fuerte; nódulos calcáreos escasos; límite neto plano.

Tabla 33. Perfil 3-1; Grava (%), fracciones texturales (%), clasificación de la textura y capacidad de retención hídrica del suelo (RH a 0, 33 y 1500 kPa; %).

Horizonte	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	RH (0 kPa)	RH (33 kPa)	RH (1500 kPa)
Ap	49.00	13.81	43.89	42.30	Arcillo limosa	50.43	15.05	256.72
Bwk	47.69	12.12	51.88	36.00	Franco arcillolimosa	49.33	16.90	316.40
C	37.14	16.31	41.39	42.30	Arcillo limosa	49.55	14.76	237.47

Tabla 34. Perfil 3-1; acidez (en H₂O y KCl), salinidad (CE, dS m⁻¹), carbonatos (%), carbono orgánico (%) y nitrógeno Kjeldahl (%).

Horizonte	pH (H ₂ O, 1:2.5)	pH (KCl, 1:2.5)	CE (1:5)	Carbonatos	C orgánico	N Kjeldahl
Ap	7.3	7.1	0.485	13.00	0.74	0.081
Bwk	7.6	7.4	0.159	18.14	0.62	0.072
C	7.6	7.3	0.240	20.45	0.73	0.074

Tabla 35. Perfil 3-1; P-Olsen (mg kg⁻¹) y oligoelementos asimilables (Fe, Mn, Cu y Zn; mg kg⁻¹).

Horizonte	P-Olsen	Fe	Mn	Cu	Zn
Ap	6.3	0.015	0.008	0.002	0.001
Bwk	7.4	0.045	0.008	0.002	0.001
C	2.8	0.008	0.006	0.001	0.005

Tabla 36. Perfil 3-1; cationes de cambio (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺, cmol (+) kg⁻¹), capacidad de intercambio catiónico (CIC, cmol (+) kg⁻¹) y saturación del complejo de cambio (V, %).

Horizonte	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	CIC	V
Ap	29.170	3.212	1.901	0.927	35.210	100.00
Bwk	32.710	5.990	0.840	4.150	43.690	100.00
C	6.599	0.850	0.089	0.478	28.570	28.06

Parada 2, Perfil 3-2. Suelos rojos, Brenes



Figura 28. Perfil 3-2 (Luvisol cálcico cutánico; izquierda) y detalle de las concreciones de carbonato cálcico (cerca de Brenes, Sevilla; derecha). Antonio Jordán/Imaggeo.

Tabla 37. Perfil 3-2; entorno.

Clasificación	Luvisol cálcico cutánico (WRB)
Observadores	Antonio Jordán, Arturo J.P. Granged, Gael Bárcenas, Lorena M. Zavala, Nicolás Bellinfante (MED_Soil Research Group, Universidad de Sevilla)
Localización	1 km al este de Brenes, Sevilla
Coordenadas	37.54543, -5.85337
Elevación	27 msnm
Pendiente	0-3%
Relieve	Llano
Drenaje superficial	Deficiente
Posición topográfica	Llanura
Material original	Material aluvial (primera terraza del Guadalquivir; Cuaternario), cantos rodados
Vegetación/uso	Cultivos leñosos

Tabla 38. Perfil 3-2; datos morfológicos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0 – 15	5YR 5/4 (s), 5YR 3/4 (h), pardo rojizo; textura franca; estructura poliédrica subangular media a gruesa; moderadamente desarrollada; duro en seco; friable en húmedo; ligeramente adherente a adherente y ligeramente plástico en mojado; no cementado; muy pocas piedras finas; poros comunes finos a medios; raíces comunes, finas a medias; reacción calcárea fuerte; nódulos calcáreos finos a medios, comunes; límite neto plano.
AB	15 – 30	5YR 4/6 (s), pardo rojizo, 5YR 3/4 (h), pardo rojizo oscuro; textura francoarenosa; estructura poliédrica subangular muy gruesa; fuertemente desarrollada; duro en seco; friable en húmedo; adherente y plástico en mojado; no cementado; sin piedras; poros escasos y finos; muy pocas raíces, muy finas a medias; reacción calcárea fuerte; nódulos calcáreos muy escasos y finos; límite neto plano.
Btck1	30 – 55	7.5 YR 6/4 (s), pardo claro, 7.5 YR 4/4 (h), pardo oscuro; textura franca; estructura poliédrica subangular gruesa a muy gruesa; fuertemente desarrollada; muy duro en seco; firme en húmedo; adherente a muy adherente y plástico a muy plástico en mojado; no cementado; sin piedras; sin poros; raíces muy escasas, muy finas;

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
		reacción calcárea extremadamente fuerte; abundantes nódulos calcáreos de todos los tamaños; límite neto plano.
Btck2	55 – 140	7.5YR 5/4 (s), pardo, 7.5YR 3/4 (h), pardo oscuro; textura francoarcillosa; estructura poliédrica subangular media a gruesa; fuertemente desarrollada; duro en seco; firme en húmedo; adherente a muy adherente y plástico en mojado; no cementado; sin piedras; sin poros; sin raíces; reacción calcárea fuerte; pocos nódulos calcáreos finos; límite neto plano.
Btck3	140 – 175	7.5YR 4/6 (s), pardo fuerte, 7.5YR 3/4 (h) pardo oscuro; textura arcillosa; estructura poliédrica angular muy gruesa; fuertemente desarrollada; duro en seco; firme en húmedo; muy adherente y muy plástico en mojado; no cementado; sin piedras; sin poros; sin raíces; reacción calcárea fuerte; nódulos calcáreos de todos los tamaños, comunes; límite neto plano.
Cck	> 175	7.5YR 7/2 (s), gris rosado, 7.5YR 5/2 (h), pardo; textura francoarcillosa; estructura poliédrica subangular media a gruesa; fuertemente desarrollada; duro en seco; firme en húmedo; adherente y ligera a moderadamente plástico en mojado; no cementado; muy pocas piedras finas; porosidad media, poros comunes finos a medios; sin raíces; reacción calcárea extremadamente fuerte; nódulos calcáreos de todos los tamaños, comunes.

Tabla 39. Perfil 3-2; Grava (%), fracciones texturales (%) y clasificación de la textura.

Horizonte	Grava	Arena fina	Arena gruesa	Limo	Arcilla	Clase Textural
Ap	41	18.9	16.3	38.1	26.7	Franca
AB	26	29.7	23.0	28.3	19.0	Franco-Arenosa
Btck1	52	18.3	11.6	45.1	25.0	Franca
Btck2	35	30.8	8.9	33.1	27.2	Franco-Arcillosa
Btck3	32	31.1	8.9	34.5	25.4	Franca
Cck	44	21.5	5.2	44.2	29.1	Franco-Arcillosa

Tabla 40. Perfil 3-2; acidez, salinidad (CE, dS m⁻¹), carbonatos (%), carbono orgánico (%) y nitrógeno Kjeldahl (%).

Horizonte	pH (1:2.5)	CE (1:5)	Carbonatos	C orgánico	N Kjeldahl
Ap	7.30	0.160	13.6	1.92	0.171
AB	7.44	0.092	4.1	0.629	0.069
Btck1	7.50	0.084	38.3	0.256	0.022
Btck2	7.45	0.092	7.3	0.028	0.019
Btck3	7.47	0.093	9.8	0.050	0.019
Cck	7.46	0.127	40.4	0.066	0.016

Tabla 41. Perfil 3-2; P-Olsen (mg kg⁻¹) y oligoelementos asimilables (Fe, Mn, Cu y Zn; mg kg⁻¹).

Horizonte	P-Olsen	K-disponible	Ca-disponible	Mg-disponible
Ap	25.8	730	5960	315
AB	1.9	258	5420	187
Btck1	<1	100	5510	173
Btck2	1.5	177	5980	159
Btck3	1.3	166	5800	157
Cck	2.7	124	5720	174

Tabla 42. Perfil 3-2; Resultados del análisis ICP (1).

Horizonte	Al	As	B	Ba	Ca	Cd	Co	Cr
Ap	26014.869	10.907	21.702	119.014	63582.270	0.111	9.958	39.296
AB	24532.875	8.470	18.435	109.482	17192.109	0.041	10.057	36.423
Btck1	19093.107	4.098	15.229	103.566	185514.719	-0.084	7.785	27.867
Btck2	29516.688	10.388	20.372	193.276	31323.342	-0.040	13.939	40.641
Btck3	28471.119	10.724	19.135	186.449	43432.230	0.053	13.157	39.782
Cck	19489.680	5.059	18.170	156.914	190406.281	0.062	7.738	30.726

Tabla 43. Perfil 3-2; Resultados del análisis ICP (2).

Horizonte	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na
Ap	30.951	24962.791	7350.939	20.495	4839.889	440.678	0.230	160.206
AB	31.678	22467.025	5953.855	18.362	3780.769	420.499	0.239	165.340
Btck1	20.344	19238.131	5612.857	13.255	4580.776	345.077	0.194	154.248
Btck2	25.426	28417.572	7617.309	20.955	5785.886	763.966	0.284	198.000
Btck3	25.227	27056.467	7532.098	20.799	5434.113	706.643	0.128	216.494
Cck	20.221	18704.797	6414.637	11.973	5696.026	399.612	0.140	236.078

Tabla 44. Perfil 3-2; Resultados del análisis ICP (3).

Horizonte	Na	Ni	P	Pb	S	Sr	V	Zn
Ap	160.206	24.354	626.919	17.437	284.161	67.315	49.380	56.247
AB	165.340	21.363	224.410	18.941	126.013	42.984	44.056	51.363
Btck1	154.248	17.992	294.291	10.263	77.416	73.429	38.233	41.774
Btck2	198.000	30.242	291.513	17.014	53.487	39.941	57.262	64.063
Btck3	216.494	28.293	273.665	16.360	63.671	46.774	56.824	60.186
Cck	236.078	18.545	560.942	10.288	103.324	117.295	37.784	45.778

Referencias y bibliografía

- Álvarez-Ayuso, E., García-Sánchez, A., Querol, X., Moyano, A., 2008. Trace element mobility in soils seven years after the Aznalcóllar mine spill. *Chemosphere*, 73, 1240-1246.
- Arenas, J.M., Carrascal, F., Gil, A., Montes, C. 2008. Breve historia de la construcción del Corredor Verde del Guadiamar. En: CMA (Ed.), *La Restauración Ecológica del Río Guadiamar y el Proyecto del Corredor Verde. La Historia de un Paisaje Emergente*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 29-64.
- Bellinfante, N. (coord.), Jordán, A., Zavala, L.M., Gómez, I.A., del Toro, M., Recio, J.M., Núñez, M.A., Corral, L., Gil J., Parras, L., Paneque, G., Paneque, P., Osta, P., Espino, C. (2007). Levantamiento de información ambiental referida a unidades geomorfoedáficas para diversas zonas de Andalucía occidental. Ref. OG-019/07. Universidad de Sevilla, Universidad de Córdoba, Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía). Sevilla.
- Borja, F., J. A. López, M. Martín, R. Mantecón, C. Mediavilla, P. del Olmo, M. Palancar, and R. Vives. 2001. Marco geográfico, geológico e hidrológico regional de la cuenca del Guadiamar. *Boletín Geológico y Minero volumen especial*: 13-34
- Borja, F., Román, J.M., Borja, C., 2008. Regionalización ecológica de la Vega y la Marisma del Guadiamar. Aproximación a la trama biofísica del Corredor Verde del Guadiamar. En: *La restauración ecológica del río Guadiamar y el proyecto del Corredor Verde. La historia de un paisaje emergente*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla, pp. 91-10.
- Burgos, P., Madejón, P., Madejón, E., Girón, I., Cabrera, F., Murillo, J.M. 2013. Natural remediation of an unremediated soil twelve years after a mine accident: Trace element mobility and plant composition. *Journal of Environmental Management*, 114, 36–45.
- Cabrera, F., Clemente, L., Díaz-Barrientos, E., López, R., Murillo, J. M., 1999. Heavy metal pollution of soils affected by the Guadiamar toxic flood. *The Science of the Total Environment* 242, 117-129.
- Cabrera, F., Murillo, J.M., Madejón, P., Domínguez, M.T., Burgos, P., Madejón, E., Marañón, T., Pérez de Mora, A., Cordón, R., Moreno, F., Girón, I.F. 2008a. Los suelos del Guadiamar: contaminación por elementos traza tras el accidente minero de Aznalcóllar. En: CMA (Ed.): *La Restauración Ecológica del Río Guadiamar y el Proyecto del Corredor Verde. La Historia de un Paisaje Emergente*. Dirección General de la RENPA y Servicios Ambientales. Junta de Andalucía, 145-164.
- CEBAC (1962). Estudio Agrobiológico de la Provincia de Sevilla. CSIC – Diputación Provincial de Sevilla. Sevilla.
- CEBAC (1971). Estudio agrobiológico de la provincia de Córdoba. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Sevilla.
- Clemente Salas, L., García Fernández, L.V., Siljestrom Ribed, P. (1998). Los suelos del Parque Nacional de Doñana. *Parques Nacionales, Colección Técnica*. Edita: Organismo Autónomo Parques Nacionales. 205p. Texto completo disponible en DigitalCSIC: URI: <http://hdl.handle.net/10261/47615>.
- Clemente, L., Cabrera, F., García, L. V., Cara, J. S., 2000. Reconocimiento de suelos y estudio de su contaminación por metales pesados en el valle del Guadiamar. *Edafología* 7, 337-349.
- CSIC-IARA (1989). Mapa de suelos de Andalucía (E 1:400.000). CSIC-IARA (Junta de Andalucía). Madrid.
- De la Rosa et al. 1984. Catálogo de Suelos de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía). Sevilla.
- De la Rosa, D., y Moreira, J. M. (coords.) (1987). Evaluación ecológica de recursos naturales de Andalucía (4 mapas, escala 1:400.000 y memoria). Servicio de Evaluación de Recursos Naturales. AMA. Junta de Andalucía. Sevilla.

- Domínguez, M.T., Alegre, J.M., Madejón, P., Madejón, E., Burgos, P., Cabrera, F., Marañón, T., Murillo, J.M. 2016. River banks and channels as hotspots of soil pollution after large-scale remediation of a river basin. *Geoderma*, 261, 133-140.
- Domínguez, M.T., Marañón, T., Murillo, J.M., Schulin, R., Robinson, B.H., 2008. Trace element accumulation in woody plants of the Guadiamar Valley, {SW} Spain: A large-scale phytomanagement case study. *Environ. Pollut.* 152, 50–59.
- Domínguez, M.T., Montiel-Rozas, M.M., Madejón, P., Diaz, M.J., Madejón, E., 2017. The potential of native species as bioenergy crops on trace-element contaminated Mediterranean lands. *Science of Total Environment* 590–591, 29–39.
- García, I., Díez, M., Martín, F., Simón, M., Dorronsoro, C., 2009. Mobility of arsenic and heavy metals in a sandy-loam textured and carbonated soil. *Pedosphere*, 19, 166-175.
- INIA (1975). Mapas provinciales de Suelos. Sevilla. Ministerio de Agricultura. Madrid.
- Jordán, A. (coord.), Zavala, L.M., Muñoz-Rojas, M., Granged, A.J.P. (2009). Obtención de indicadores a partir de la base de perfiles de suelo para su aplicación a la modelización climática, Ref. 0501/0268. Universidad de Sevilla, Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía). Sevilla.
- López-Pamo, E., Baretino, D., Antón-Pacheco, C., Ortiz, G., Arránz, J.C., Gumiel, J.C., Martínez-Pledel, B., Aparicio M., Montouto, O. 1999. The extent of the Aznalcóllar pyritic sludge spill and its effects on soils. *The Science of the Total Environment*, 242, 57-88.
- Madejón, E., Madejón, P., Burgos, P., Pérez de Mora, A., Cabrera, F. 2009. Trace elements, pH and organic matter evolution in contaminated soils under assisted natural remediation: A 4-year field study. *Journal of Hazardous materials*, 162, 931-938
- Madejón, P., Domínguez, M.T., Fernández-Boy, E., Paneque, P., Girón, I., Madejón, E., 2019. Soil hydraulic properties as the main driver in the establishment of biomass crops in contaminated soils. *Journal of Environmental Management* 233, 812–822.
- Madejón, P., Domínguez, M.T., Madejón, E., Cabrera, F., Marañón, T., Murillo, J.M., 2018a. Soil-plant relationships and contamination by trace elements: A review of twenty years of experimentation and monitoring after the Aznalcóllar (SW Spain) mine accident. *Science of Total Environment* 625, 50–63.
- Montiel-Rozas, M.M., Domínguez, M.T., Madejón, E., Madejón, P., Pastorelli, R., Renella, G., 2018. Long-term effects of organic amendments on bacterial and fungal communities in a degraded Mediterranean soil. *Geoderma* 332, 20–28.
- Siljestrom Ribed, P. (2015). Características geomorfológicas e hidrológicas del sistema de lagunas. En: C. Díaz-Paniagua (Coordinadora) *El Sistema de Lagunas Temporales de Doñana, Una Red de Hábitats Acuáticos Singulares*. Edita: Organismo Autónomo Parques Nacionales. 21-44pp.
- Simón, M., Ortiz, I., García, I., Fernández, E., Fernández, J., Dorronsoro, C., Aguilar, J. 1999. Pollution of soils by the toxic spill of a pyrite mine (Aznalcóllar, Spain). *The Science of the Total Environment*, 242, 105-115.

Enlaces de interés

RENS

- RENS2019: <https://www.rens.es/rens-2019>
- Reuniones Nacionales de Suelos: <https://www.rens.es/reuniones-anteriores>

Organizadores

- Grupo de investigación MOSS (IRNAS/CSIC): <https://www.irnas.csic.es/moss>
- Grupo de investigación MED_Soil (US): <http://grupo.us.es/medsoil>

Instituciones

- Sociedad Española de la Ciencia del Suelo (SECS): <http://www.secs.com.es>
- Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS):
<https://www.irnas.csic.es>
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC): <https://www.csic.es>
- Universidad de Sevilla: <http://www.us.es>
- Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola (US):
<http://departamento.us.es/dcmqa>

Colaboradores

- Evenor-Tech: <http://www.secs.com.es>: <http://www.evenor-tech.com>

moss



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

MED  **Soil**

US

UNIVERSIDAD
DE SEVILLA

• 1505 •