



Universidad
de Huelva



Caracterización y modelación hidrogeológica de las balsas de fosfoyesos y su entorno

Franco Coscia

Enric Vázquez-Suñé

Manuel Olías Álvarez

Estanislao Pujades

Ignacio Bulboa

INDICE

INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS Y METODOLOGIAS	5
MODELO CONCEPTUAL	6
SITUACIÓN GEOGRÁFICA	6
GEOLOGÍA.....	9
HIDROGEOLOGÍA.....	13
PARÁMETROS HIDRÁULICOS	16
ELEMENTOS Y FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICOS	17
BALANCE HÍDRICO	18
<i>Entradas</i>	19
<i>Salidas</i>	21
MODELO NUMÉRICO	23
GENERALIDADES.....	23
DOMINIO DEL MODELO	23
DISCRETIZACIÓN HORIZONTAL	25
DISCRETIZACIÓN VERTICAL.....	26
PARAMETRIZACIÓN HIDRÁULICA	28
CONDICIONES DE CONTORNO	31
PUNTOS DE OBSERVACIÓN	34
CALIBRACIÓN MODELO ESTACIONARIO	35
PIEZOMETRÍA.....	37
BALANCE HÍDRICO	38
RESULTADOS	40
CONCLUSIONES	42
REFERENCIAS	44

INTRODUCCIÓN

Desde la década de 1960, sobre las marismas de la ría de Huelva, en la confluencia de la desembocadura de los ríos Tinto y Odiel, Suroeste de España, se localiza un complejo industrial químico, el cual consta de diversas plantas de producción de ácido fosfórico para fertilizantes. El proceso de producción se basa en un ataque químico húmedo a la roca fosfática (fluorapatita, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) con ácido sulfúrico (H_2SO_4) para producir ácido fosfórico (H_3PO_4) como producto comercial y un residuo de poco valor comercial compuesto principalmente de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), conocido como fosfoyeso. Dicho residuo ha sido vertido sobre las marismas de la ría de Huelva en diferentes etapas y en distintas formas, parte de los residuos se consideran restaurados, como las zonas 1 y 4, mientras que las zonas 2 y 3 aún no han sido restauradas (Figura 1).

El fosfoyeso contiene grandes cantidades de metales, metaloides y radionucleidos. Al ser un mercado pobre en este residuo, su producción tiende a apilarse en grandes cantidades en sitios cercanos a su producción. En el estuario de Huelva, la pila de fosfoyeso, tiene aproximadamente 1000 ha y 100 Mt, este vertedero se dispone a menos de 1 km de la ciudad de Huelva, y al ser considerados residuos NORM (residuos que contienen radionucleidos naturales) han despertado una gran preocupación social en los últimos años.

El presente documento se enmarca dentro de la Acción Especial de la Conserjería de Economía y Conocimiento de la Junta de Andalucía, Proyecto de Investigación "Caracterización y modelación hidrogeológica de las balsas de fosfoyesos y su entorno", el cual es llevado a cabo por la Universidad de Huelva (UHU) y el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

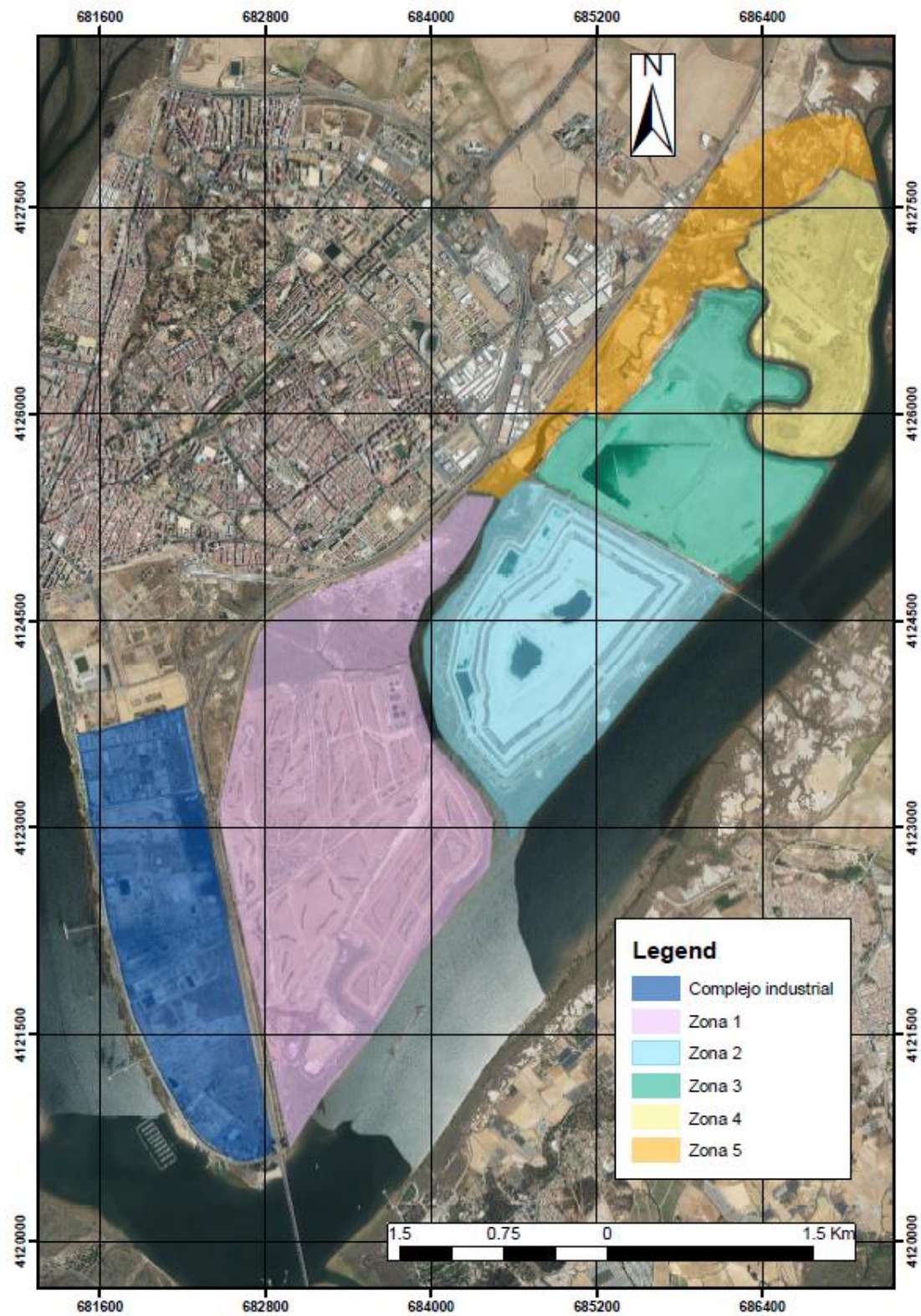


Figura 1. Zonificación de los vertidos de fosfoyesos en las marismas de la ría de Huelva.

OBJETIVOS Y METODOLOGIAS

El objetivo principal de este trabajo de investigación es la caracterización y realización de un modelo hidrogeológico numérico en 3D de las balsas de fosfoyesos y su entorno. Para alcanzar estos objetivos, se han planificado las siguientes tareas a resolver:

- Revisión y evaluación de la información hidrogeológica disponible.
- Análisis e interpretación de los datos disponibles de datos meteorológicos, niveles piezométricos, ensayos de bombeos, características hidrogeoquímicas, etc. de las distintas unidades hidrogeológicas de la zona.
- Cuantificación del balance hidrogeológico.
- Realización de labores de campo para la obtención de datos complementarios (muestreos, ensayos de bombeos, etc.).
- Elaboración de un modelo hidrogeológico.
- Modelación hidrogeológica 3D de la zona de las balsas de fosfoyesos.

Para ello, se ha revisado con detalle los informes de índole hidrogeológica de la zona de estudio, entre ellos, informes pertenecientes a la compañía Fertiberia (2014, 2018), consultorías externas, publicaciones en revistas científicas, informes geológicos realizados por la Universidad de Huelva, etc.

Para la elaboración del modelo numérico hidrogeológico se ha utilizado el código de elementos finitos FEFLOW v.7.4, que resuelve la ecuación de flujo en el medio subterráneo saturado. Este código ha sido seleccionado porque permite incorporar geometrías complejas y estructuras geológicas mediante mallado no estructurado, por lo que es un código adecuado para simular de una forma realista este tipo de problemas.

Cabe mencionar que, algunas de las tareas propuestas para alcanzar los objetivos no se pudieron realizar debido a la negativa de Fertiberia de permitir el acceso a los terrenos de los fosfoyesos. Tampoco ha sido posible acceder a la base de datos hidrometeorológicos, caudales vertidos, etc., de que dispone Fertiberia.

MODELO CONCEPTUAL

Situación Geográfica

El área de estudio se sitúa al SW de la península ibérica, en la comunidad autónoma de Andalucía, España, junto a la ciudad de Huelva, a unos 3 km de la confluencia de los ríos Tinto y Odiel, cerca de su desembocadura en la ría de Huelva.

Debido a la gran superficie que ocupan los apilamientos de fosfoyeso y de acuerdo al proyecto de clausura de las balsas de fosfoyesos a realizar por Fertiberia, el presente trabajo se centra en las balsas y apilamientos de las zonas 2 y 3 del vertedero industrial.

El apilamiento de fosfoyesos ha sido depositado en las marismas del Rincón y Mendaña, por ello es de suma importancia conocer cómo era la superficie natural de las marismas previamente al vertido del residuo industrial. En el lado izquierdo de la Figura 2 puede observarse una fotografía aérea de los años 1956-1957, donde es posible distinguir los canales mareales y la divisoria de aguas de las zonas 2 y 3. Estos canales actúan como vías de preferencia para la circulación del agua, en tanto que la divisoria establece el límite que drena las aguas hacia el río Tinto y hacia el estero del Rincón. En el lado derecho de la Figura 2, se observa la misma superficie de la marisma, pero ocupada por los fosfoyesos y sus balsas en una fotografía más reciente tomada en 2015.

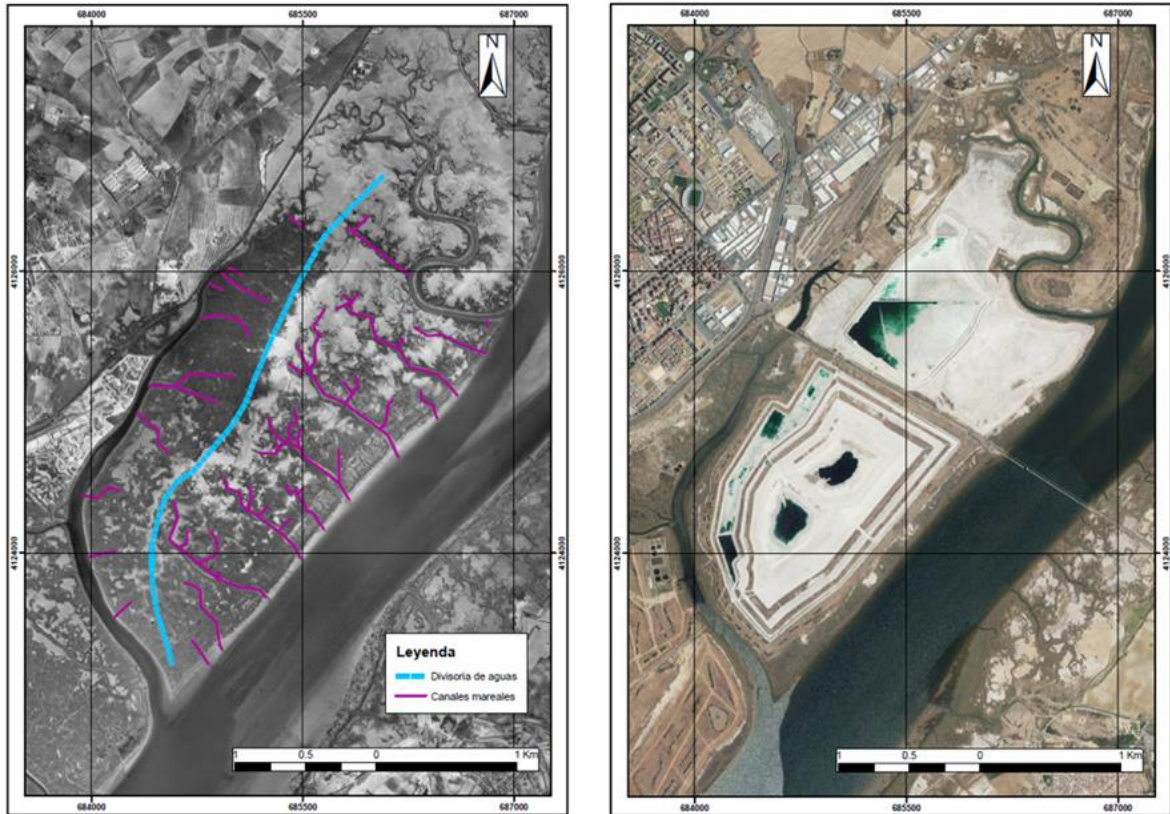


Figura 2. A la izquierda: fotografía aérea de las marismas en años 1956-1957 con sus elementos hidrológicos principales. A la derecha: fotografía aérea del año 2015, donde se observan las balsas y las superficies de fosfoyesos.

De este modo, son las zonas 2 y 3 el objeto de estudio (Figura 3). Dentro de estas zonas el apilamiento presenta varias balsas con características y funciones diferentes. Las características y funciones de las balsas se resumen a continuación:

- Balsas Principales (zona 2): constituida por dos balsas que forman la coronación del apilamiento de fosfoyesos en dicha zona. Aquí se vierte el agua de producción y se produce la precipitación y decantación del fosfoyeso
- Embalse de Regulación (zona 2): balsa elongada que se sitúa en el lado Norte del apilamiento. Las aguas de drenaje de las bermas se recogen en el canal perimetral desde donde son conducidas al embalse de regulación.
- Balsa de Emergencia (zona 3): situada en la zona 3 junto al estero de Mendaña.

Además, existen un conjunto de bermas a diferentes cotas, donde se sitúan los diferentes canales de drenaje.

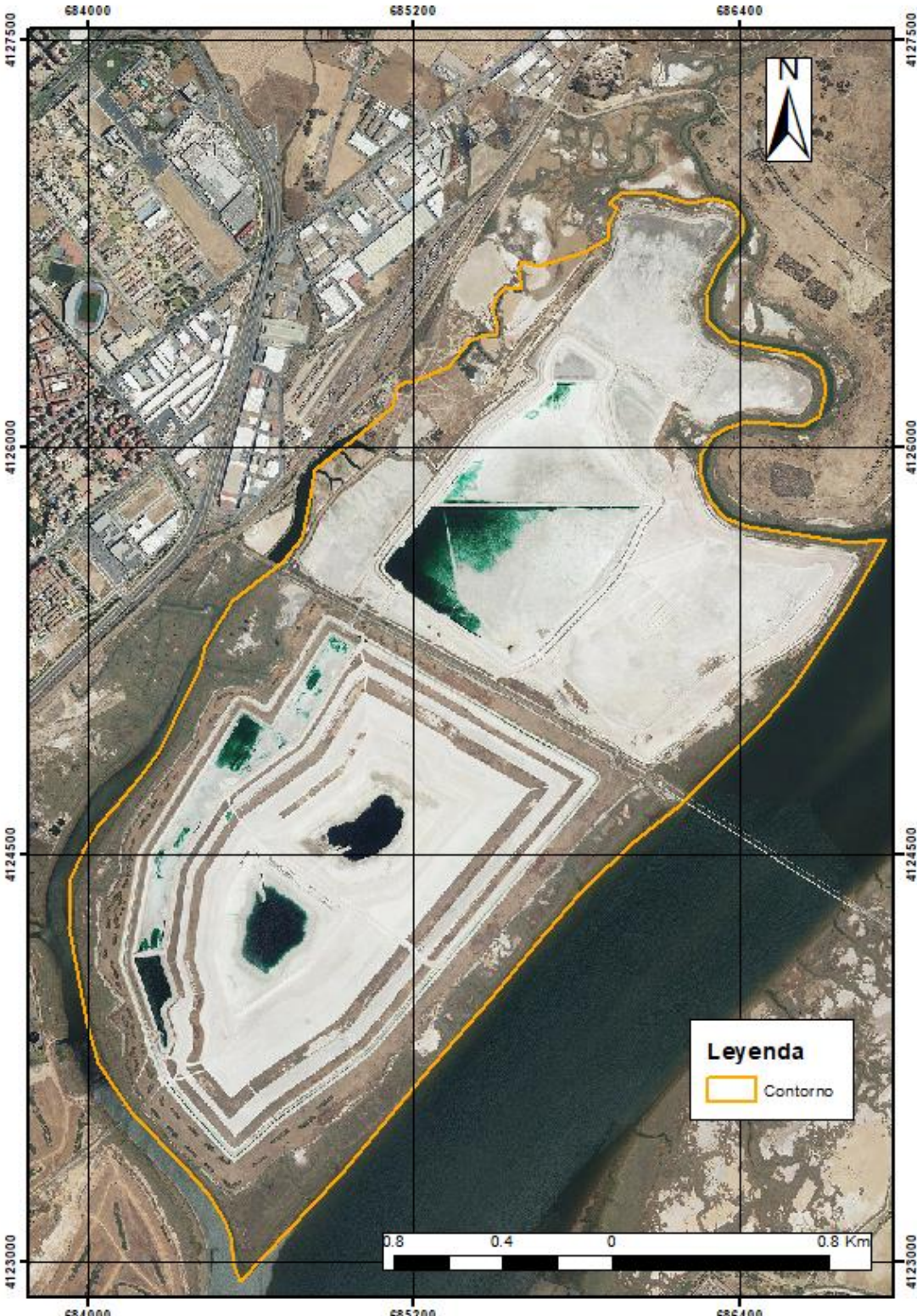


Figura 3. Contorno de la zona de estudio.

Geología

En esta sección se describen las unidades litológicas y los principales procesos geológicos ocurridos en la zona de estudio. La Tabla 1 describe brevemente las principales unidades en la zona de estudio. La zona se caracterizó geológicamente a través de la revisión de los sondeos realizados por Fertiberia a lo largo de numerosas campañas, y considerando las descripciones e interpretaciones geológicas realizadas por la cátedra de Geología de la Universidad de Huelva, en la Figura 4 se muestra un ejemplo de la sección vertical de las zonas 2 y 3.

Tabla 1. Unidades geológicas de la zona de estudio.

	Unidad geológica	Litología
Relleno antrópico	Fosfoyesos	Residuo industrial
Complejo Estuarino Superior	E6	Fangos estuarinos
	E4 – E5	Limos arcillosos/arcillas limosas
Arenas Intermedias	E3	Arenas finas/medias
Complejo Estuarino Inferior	E1-E2	Limos arcillosos, limos arenosos, arenas limosas
Niveles Inferiores Detríticos	F2	Gravas fluviales
	PT2v	Limos arenosos
	PT2a	Gravas heterogéneas, matriz limosa
Margas azules	Mio	Limos y arcillas

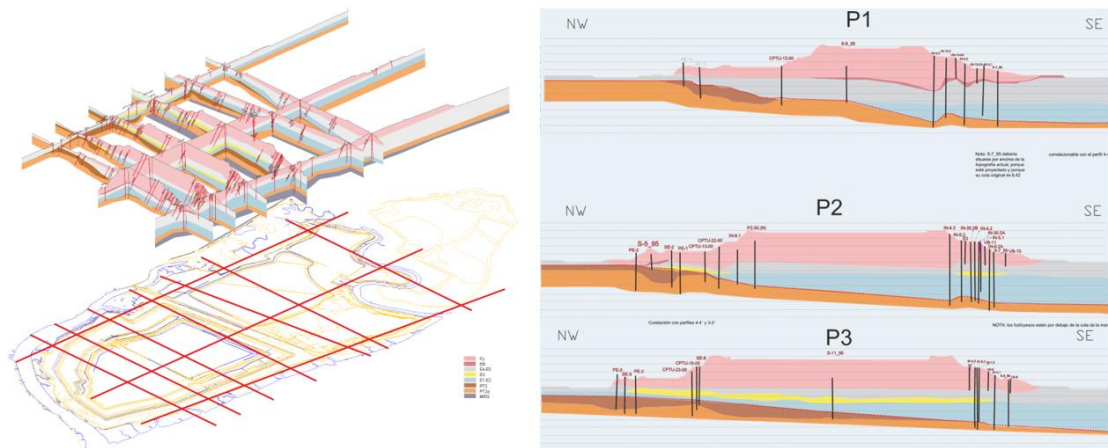


Figura 4. Secciones verticales realizados por la cátedra de geología de la UHU.

A continuación, se exponen las unidades y procesos geológicos, ordenados de manera cronológica creciente:

Sustrato de margas azules del Mioceno

Esta unidad está formada por una serie de limos y arcillas de color gris azulado, equivalentes al tramo superior de la Formación Arcillas de Gibrleón (Civis et al., 1987) cuya edad comprende desde el Mioceno Superior al Plioceno bajo.

Estas arcillas masivas y sin estratificación visible presentan un contenido en carbonato que varía entre un 20% y un 40%, siendo la fracción arenosa inferior al 5% (Civis et al., 1987). En la ciudad de Huelva sólo aflora el techo de la formación, observándose numerosas evidencias de bioturbación y tramos donde la presencia de glauconita es muy abundante (A. Bochs Montoro et al., 2006).

Discordancia D1

La base del Pleistoceno superior está constituida por un contacto de tipo discordante erosivo, que se generó de forma repetida durante los periodos glaciales con el nivel del mar bajo. En la zona de estudio, todas las formaciones del Plioceno, así como el Pleistoceno

inferior fueron dismanteladas, poniendo esta discordancia en contacto los materiales del Pleistoceno superior con los del Mioceno.

Conjunto Aluvial Pleistoceno (PT2)

Este conjunto de origen continental ha sido dividido en dos unidades PT2v y PT2a, ya que sus características hidrogeológicas son claramente diferentes.

La unidad superior PT2v está compuesta por limos arenosos, cuyo color varía desde marrón-rojizo a gris-verdosos y beige, en función del área fuente de los materiales que lo forman.

La unidad inferior, PT2a, está compuesta por un nivel de gravas heterogéneas de composición principalmente silícea, con una matriz limosa.

Discordancia D2

La base de los depósitos Holocenos queda definida por una discordancia erosiva. Esta discordancia permite que los sedimentos Holocenos se apoyen directamente sobre el sustrato Mioceno, en las partes centrales del estuario donde la erosión fue mayor.

La erosión fue producida por el Río Tinto a finales del Pleistoceno, en un momento en el que el nivel del mar era más bajo.

Unidad Conglomerática Basal (F2)

Este complejo de origen continental, marca el comienzo de la transgresión marina del Holoceno, está compuesto por la unidad F2.

La unidad F2 está formada por una capa de arenas finas y medias con gravas dispersas y englobadas en una matriz de arcilla, donde los indicios de bioturbación y presencia de microfauna siguen ausentes.

Los cantos son en su mayoría de composición silícea, bien seleccionados y subredondeados, manifestando un origen claramente fluvial.

Esta unidad ha sido interpretada como un paleocanal del río Tinto.

Complejo Estuarino Inferior (E1-E2)

Complejo granocreciente formado por dos unidades E1 y E2, que de techo a muro se disponen de la siguiente manera:

La unidad E1 está compuesta en su mayoría por limos arcillosos de color gris oscuro verdeazulado, aumentando ligeramente el porcentaje de materiales arenosos hacia el techo de la misma.

La unidad E2 compuesta por arenas fangosas grises, aumentando el contenido en arenas hacia techo de la unidad. El contenido en limos puede alcanzar el 40%, disminuyendo el contenido en arcillas hacia techo.

Arenas Intermedias (E3)

Constituye un cuerpo de espesor variable de arenas que puede alcanzar hasta los 10 metros. Desde el punto de vista litológico puede describirse como arenas limpias, sueltas, de tamaño arenas medias bien clasificadas, de color beige claro. Progresivamente son reemplazadas hacia techo por niveles de arenas finas, igualmente limpias, aunque con algunas intercalaciones decimétricas de arenas fangosas y fangos arenosos. La correlación entre los diferentes sondeos ha permitido observar que la morfología de este cuerpo es canaliforme, acuñándose hacia Noroeste y Sureste, donde desaparece, aunque el recorrido de este paleocanal no coincide con el actual trazado del canal estuarino del río Tinto.

Complejo Estuarino Superior (E4-E5)

Complejo granodecreciente formado por dos unidades E5 y E4, que de techo a muro son: la unidad E5 está compuesta por una serie de limos arcillosos (muy plásticos) de color negro.

La unidad E4 está compuesta por arenas limosas de color gris, las cuales han sufrido una intensa bioturbación. El porcentaje de arenas finas varía entre un 40-50%, siendo la

proporción de limos menor, mientras que la de arcillas no supera el 9% (J. Borrego et al., 1999).

Unidades de marisma (E6)

Esta unidad está compuesta por limos arcillosos de color pardos-rojizos que presentan una fuerte bioturbación por raíces. El porcentaje de limos varía entre el 50-60% predominando sobre la fracción arcillosa que oscila entre un 15-20%. El espesor de esta unidad suele ser de 1 metro. Sobre esta unidad se desarrollan los canales de marea.

Apilamiento de fosfoyesos (Fys)

El apilamiento de los fosfoyesos se realiza directamente sobre la marisma de Mendaña y del Rincón, cuya topografía condiciona la base del apilamiento. El sistema de marismas incluía los denominados canales de marea, a través de los cuales se canalizaban las fluctuaciones diarias de la marea. Estos canales presentan una litología claramente diferente a la zona vegetada de la marisma, compuesta por materiales muy finos y con gran contenido en materia orgánica. Los canales mareales tienen, por norma general, un mayor contenido en arenas y limos, que el resto de la llanura y representan zonas de mayor permeabilidad y, por lo tanto, puntos de drenaje preferente.

Debido a esto se considera relevante el estudio detallado de la morfología y ubicación de dichos canales de marea presentes en la marisma. Esta superficie de apoyo resulta de gran interés hidrogeológico ya que puede determinar zonas de circulación preferencial de las aguas subterráneas por la base de los fosfoyesos.

Hidrogeología

Las unidades hidrogeológicas son aquellas por donde circulan las aguas subterráneas. La circulación tiene lugar a través de los poros y/o grietas de las rocas y/o sedimentos, y depende de un parámetro llamado conductividad hidráulica. Por lo tanto, una conductividad hidráulica

elevada favorecerá la circulación del agua subterránea, mientras que una baja conductividad hidráulica hará que esta tenga una mayor dificultad para fluir.

Las unidades hidrogeológicas presentes en la zona de estudio se encuentran descritas brevemente en la Tabla 2, donde también se muestra su unidad geológica equivalente. A grandes rasgos, pueden diferenciarse tres grupos de unidades hidrogeológicas: la unidad correspondiente a los residuos de fosfoyesos, las unidades correspondientes a la marisma o Complejo Estuarino y, por último, la unidad de los niveles inferiores detríticos. Por debajo, aparece un potente paquete de limos y arcillas (margas azules) de muy baja conductividad hidráulica.

Tabla 2. Unidades hidrogeológicas.

	Unidad geológica	Litología	Unidad Hidrogeológica
Relleno antrópico	Fosfoyesos	Residuo industrial	Fosfoyesos
Complejo Estuarino	E6	Fangos estuarinos	Complejo Estuarino
Superior	E4 – E5	Limos arcillosos/arcillas limosas	
Arenas Intermedias	E3	Arenas finas/medias	
Complejo Estuarino Inferior	E1-E2	Limos arcillosos, limos arenosos, arenas limosas	
Niveles Inferiores	F2	Gravas fluviales	Niveles Inferiores
Detríticos	PT2v	Limos arenosos	Detríticos
	PT2a	Gravas heterogéneas, matriz limosa	
Margas azules	Mio	Limos y arcillas	

A continuación, se realiza una breve descripción de las mismas considerando los aspectos hidráulicos, ya que la descripción geológica ya ha sido comentada.

Unidad Fosfoyesos

Esta unidad en un sentido estricto no puede ser considerada como una unidad geológica, ya que su origen es antrópico. No obstante, este residuo industrial está formado por material con partículas de un tamaño similar al limo y/o arenas muy finas con una conductividad hidráulica relativamente elevada.

Complejo Estuarino (marismas)

Esta unidad corresponde a los depósitos de la marisma sobre los que se apoyan los fosfoyesos. Presentan tres formaciones principales:

- Complejo Estuarino Superior: presentan materiales con un tamaño de grano bastante fino, lo que le confiere una baja a muy baja conductividad hidráulica, por lo que la circulación de agua en estas capas es muy restringida. Esto tiene un papel fundamental pues dificulta la filtración de las aguas de los fosfoyesos hacia las capas subyacentes.
- Arenas Intermedias: es la unidad con mayor conductividad hidráulica del Complejo Estuarino. Esta capa no tiene una continuidad lateral y se acuña hacia los extremos.
- Complejo Estuarino Inferior: estas unidades presentan valores de conductividad hidráulica muy bajos, similares a los del Complejo Estuarino Superior.

Niveles Inferiores Detríticos

Los materiales que componen esta unidad presentan conductividades hidráulicas altas, especialmente F2 y PT2a, por lo que han sido considerada como la misma unidad. La unidad PT2v presenta valores menores, aunque no tiene un gran desarrollo en la zona de estudio, ya que ha sido erosionada en gran medida. Esta unidad forma parte de la Masa de Agua Subterránea Niebla (código 30593).

Parámetros hidráulicos

En la zona de estudio se han realizados numerosos y variados tipos de ensayos con el fin de caracterizar hidráulicamente las unidades hidrogeológicas. Los ensayos realizados fueron principalmente de dos tipos: ensayos hidráulicos y ensayos geotécnicos.

Dentro de los ensayos hidráulicos se han realizado ensayos de bombeo y de recuperación, ensayos de tipo Lefranc y ensayos de tipo Lugeon. Los ensayos geotécnicos llevados a cabo fueron ensayos con presión en cola y a carga constante y análisis granulométricos mediante el método de Curvas de Breddin.

La Tabla 3 muestra valores de conductividad hidráulica obtenidos a partir de información bibliográfica. Cuando existen múltiples valores de conductividad hidráulica obtenidos mediante más de un método de cuantificación, se ha priorizado aquellos valores obtenidos mediante el método más fiable. En caso de contar con más de un método de cuantificación fiable, se ha trabajado con la media aritmética de todos los valores (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros hidráulicos obtenidos de la bibliografía.

Unidad geológica	Conductividad hidráulica media (m/d)	Método escogido
Fosfoyesos	0.1	Lefranc
E6	0.00001	Ensayos con presión en cola
E4 – E5	0.0001	
E3	1	Ensayos de bombeo
E1-E2	0.27	
PT2v	0.000864	Curvas de Breddin
PT2a-F2	50	Ensayos de bombeo

Elementos y funcionamiento hidrogeológicos

Los elementos hidrogeológicos que conforman el sistema se representan en la Figura 5, estos son fundamentales en el funcionamiento hidrogeológico de las balsas de fosfoyesos y su entorno.

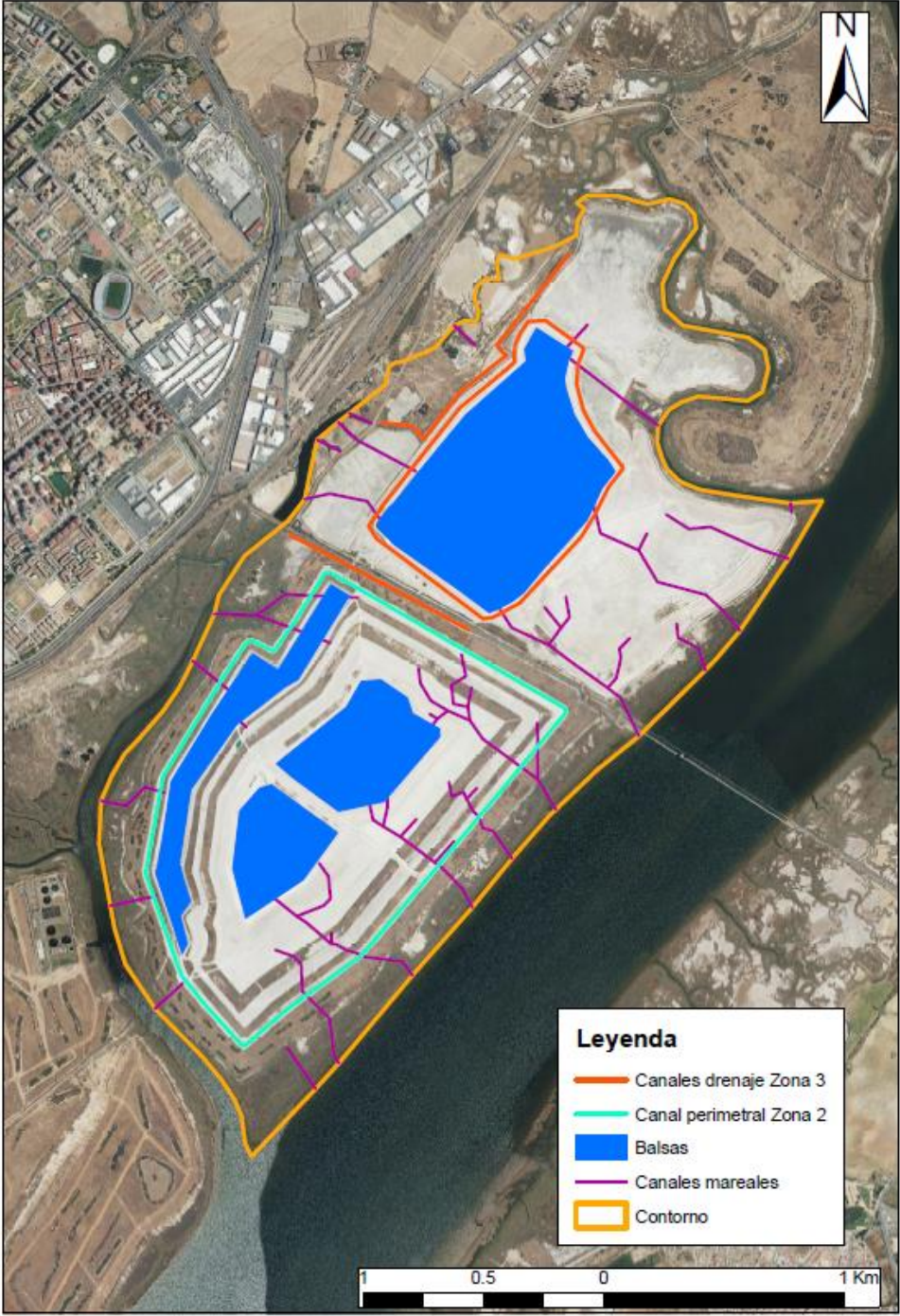


Figura 5. Elementos hidrogeológicos de las balsas de fosfoyesos en las zonas 2 y 3.

Las entradas de agua se producen principalmente por: (a) la infiltración de las precipitaciones caídas directamente sobre los fosfoyesos en las zonas 2 y 3, y sobre los materiales que los recubre en las zonas 1 y 4 y, (b) las entradas de agua desde la Ría del Tinto y sus esteros a través de los canales mareales. Hasta el año 2010 también existían unas entradas importantes por los caudales que vertía la empresa Fertiberia.

Parte del agua de infiltración de las precipitaciones es interceptada por los canales perimetrales principales de cada zona y se vuelve a verter hacia las balsas. No obstante, estos canales no captan todo el flujo de agua subterránea ya que se encuentran algunos metros por encima del basamento de marisma y, por lo tanto, el agua que no es interceptada sigue su curso. Al llegar al contacto entre los fosfoyesos y la unidad de marisma, el flujo subterráneo no puede seguir descendiendo debido a la baja conductividad hidráulica de los materiales arcillosos de las marismas. Esto hace que el agua subterránea circule en sentido lateral a través de vías de mayor permeabilidad, que son los canales mareales o de disolución, y lleguen hasta la ría del Tinto. A estas surgencias se las conoce como salidas de borde.

Balance hídrico

El cálculo del balance se realiza en condiciones de régimen estacionario para un estado operativo de producción (año 2009). Para realizar el balance se han diferenciado las entradas y salidas. La ecuación del balance para las balsas de fosfoyesos y su entorno en estadio operacional es:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \Delta S \pm \text{error}$$

En régimen estacionario $\Delta S = 0$, por lo tanto:

$$\text{REC}_D + \text{REC}_{\text{SUP}} + \text{BOM}_{\text{INY}} - \text{EVP}_{\text{LL}} - \text{SB} - \text{SE} = 0$$

$$\text{REC}_D + \text{REC}_{\text{SUP}} + \text{BOM}_{\text{INY}} = \text{EVP}_{\text{LL}} - \text{SB} - \text{SE}$$

Siendo ΔS la variación del almacenamiento del sistema, donde:

REC_D es la Recarga Directa por Lluvia sobre las balsas.

REC_{SUP} es la Recarga por balance hidrometeorológico, lluvia sobre la superficie.

BOM_{INY} son los bombeos inyectados a las balsas durante el proceso de producción.

EVP_{LL} es la evaporación en la lámina libre de las balsas

SB son las salidas de borde, en el contacto marismas-fosfoyesos; y

SE son las salidas al río Tinto y canales.

A continuación, se explica el balance hídrico para cada área y sus cálculos.

Entradas

Las entradas al sistema tienen dos componentes principales: una vinculada a las precipitaciones y otra relacionada a la producción fosfoyesos.

La componente relacionada a las precipitaciones se ha diferenciado según donde ocurran las mismas, si es sobre las balsas, o bien sobre la superficie de fosfoyesos. De esta manera, se las llama recarga directa y recarga por balance hidrometeorológico respectivamente.

Para ambos casos, se han utilizados los datos de precipitaciones promedio (600 mm/a) registradas en la estación meteorológica Moguer, Huelva para un año hidrológico completo.

Para calcular la recarga directa por precipitaciones se ha realizado el producto entre el área correspondiente a cada balsa y la precipitación promedio (Tabla 4), obteniendo un valor cercano a 1500 m³/d.

Tabla 4. Balance recarga directa por precipitaciones.

Zonificación	Área (m ²)	Precipitaciones (m/d)	Recarga (m ³ /d)
Balsa NE	204858.0	0.0013	272.5
Balsa SW	140527.2	0.0013	187
Balsa Regulación	167633.0	0.0013	223
Balsa Emergencia	589018.1	0.0013	786.5
Total			1466

La recarga realizada a través del balance hidrometeorológico, es decir, la calculada sobre las precipitaciones acaecidas sobre la superficie de los fosfoyesos, han sido estimadas utilizando el software EasyBal (Tabla 5). Los datos de entrada que necesita el software (Tabla 6) son las precipitaciones, características físicas del suelo, valores de ETP (1562 mm/a), calculada por el método de Hargreaves, y latitud de la estación meteorológica (37°). El resultado cálculo para la recarga a través del balance hidrometeorológico fue de 125 mm/a.

Tabla 5. Recarga hidrometeorologica.

Zonificación	Área (m ²)	Recarga hidrometeo. (m/d)	Recarga (m ³ /d)
Sup. Fosfoyesos	3381050.9	0.00028	950

El suelo de fosfoyeso se ha considerado como franco limoso (Fertiberia, 2014). Con esta clasificación se han identificado los parámetros edáficos de este tipo de suelo: capacidad de campo (0,284), punto de marchitez permanente (0,135), la humedad inicial se ha considerado a partir de la capacidad de campo totalmente saturada, espesor radicular (0,1 m) y valor de laminación (10 mm/d).

Tabla 6. Datos de entrada para el software EasyBal.

Datos de entrada para balance hidrometeorológico.	
Tipo de suelo (clasificación USDA)	Franco limosa
Capacidad de campo	0.284
Humedad inicial	0.284
Punto de marchitez permanente	0.315
Espesor radicular	0.1
Valor de laminación	10 mm/a
Latitud estación Moguer	37°
ETP (Hargreaves)	1562 mm/a

El termino relativo a los bombeos vertidos por Fertiberia S.A en las balsas NE y SW, fueron obtenidos del documento Fertiberia (2014), donde se especifican los caudales de producción durante el año 2009. El caudal promedio durante ese año fue de 1050 m³/d.

Salidas

Las salidas del sistema se producen por la evaporación de lámina libre de los cuerpos de agua, las salidas de borde en el contacto fosfoyesos-marisma y salidas al río Tinto y a los esteros del Rincón y Mendaña.

Para la evaporación en lámina libre se han obtenido valores de Fertiberia (2014) y de la estación meteorológica Moguer, el valor promedio estimado es de 1440 mm/a. Considerando el área de las balsas y la evaporación de lámina libre, se obtiene un valor estimado de 4000 m³/d. Las medidas realizadas en los tanques de evaporación son, por lo general mayores a la evaporación potencial, esto es debido a las características de la instrumentación y a la salinidad del agua. Por lo tanto, es necesario realizar correcciones al valor obtenido por el método tradicional. Al no disponer de materiales para obtener los coeficientes necesarios para realizar las correcciones, el valor obtenido ha sido corregido como en Marazuela et al. (2019),

donde se obtuvo una reducción cercana al 30 % de la evaporación medida sin correcciones. Aplicando ducha reducción se obtiene un valor de evaporación de 3.000 m³/d, aproximadamente.

Los caudales de salidas de borde han sido obtenidos a partir del informe Fertiberia (2014) y de publicaciones científicas (R. Pérez-López, 2015). Los aforos determinados son de 250 m³/d y 900 m³/d, respectivamente. En tanto que las salidas al canal y río Tinto se pretenden estimar mediante el balance.

La Tabla 7 indica los caudales de entrada y salida del sistema mediante el modelo conceptual realizado.

Tabla 7. Balance hídrico.

Entradas	Salidas
Recarga directa lluvias $\approx 1500 \text{ m}^3/\text{d}$	Evaporación en lámina libre $\approx 3000 \text{ m}^3/\text{d}$
Recarga hidrometeorológica $\approx 950 \text{ m}^3/\text{d}$	Salidas de borde $\approx 250 - 900 \text{ m}^3/\text{d}$
Bombeos a las balsas $\approx 1050 \text{ m}^3/\text{d}$	Salidas a canal y río Tinto ¿?
Total $\approx 3500 \text{ m}^3/\text{d}$	Total $\approx 3.000 \pm 250 - 900 \text{ m}^3/\text{d}$

MODELO NUMÉRICO

Generalidades

El modelo numérico hidrogeológico se construyó utilizando el código de elementos finitos FEFLOW v7.4 (Diersch, 2014), que es capaz de resolver la ecuación de flujo y transporte en el medio subterráneo. FEFLOW permite la implementación de geometrías complejas y la incorporación de estructuras geológicas mediante un mallado no estructurado. Esta flexibilidad del mallado hace que sea un código adecuado para representar la geometría particular de las balsas de fosfoyesos de las zonas 2 y 3. Igualmente, permite un refinamiento de la malla adaptándose a los elementos o zonas de interés (balsas, canales mareales, drenes, pozos, entre otros). FEFLOW admite la paralelización de los procesos y en concreto, del problema inverso, lo cual consigue una reducción razonable de los tiempos de computación. Dicho problema inverso se resuelve a través del software PEST (Doherty, 2015) que se utiliza ampliamente en modelación ambiental para la calibración automática de modelos hidrogeológicos.

Dominio del modelo

El dominio del modelo abarca gran parte de las marismas del Rincón, principalmente las zonas 2 y 3 de los vertidos de fosfoyeso.

Los límites del modelo han de permitir asignar las condiciones físicas reales basadas en las conclusiones del modelo conceptual. En este sentido, todos los límites han sido definidos a partir de condiciones geológicas e hidrogeológicas conocidas. Por consiguiente, y a nivel de modelación, se definen los siguientes contornos (Figura 6):

- Margen derecha del río Tinto, en dirección hacia su desembocadura.
- Canal colindante con marisma Mendaña.
- Estero del Rincón.
- Parte del Estero del Rincón que ha sido sepultado con relleno antrópico.

El límite superior del modelo coincide con la superficie del terreno. Para ello, se ha utilizado un modelo de elevación de digital (DEM por sus siglas en inglés) LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging). La resolución del DEM es 1 m. El límite inferior del modelo lo constituye el techo de la unidad Margas azules del Mioceno, explicada en la sección del modelo conceptual. La característica principal de esta unidad es que presenta una conductividad hidráulica muy baja. El dominio del modelo abarca un área de aproximadamente 6 Km².

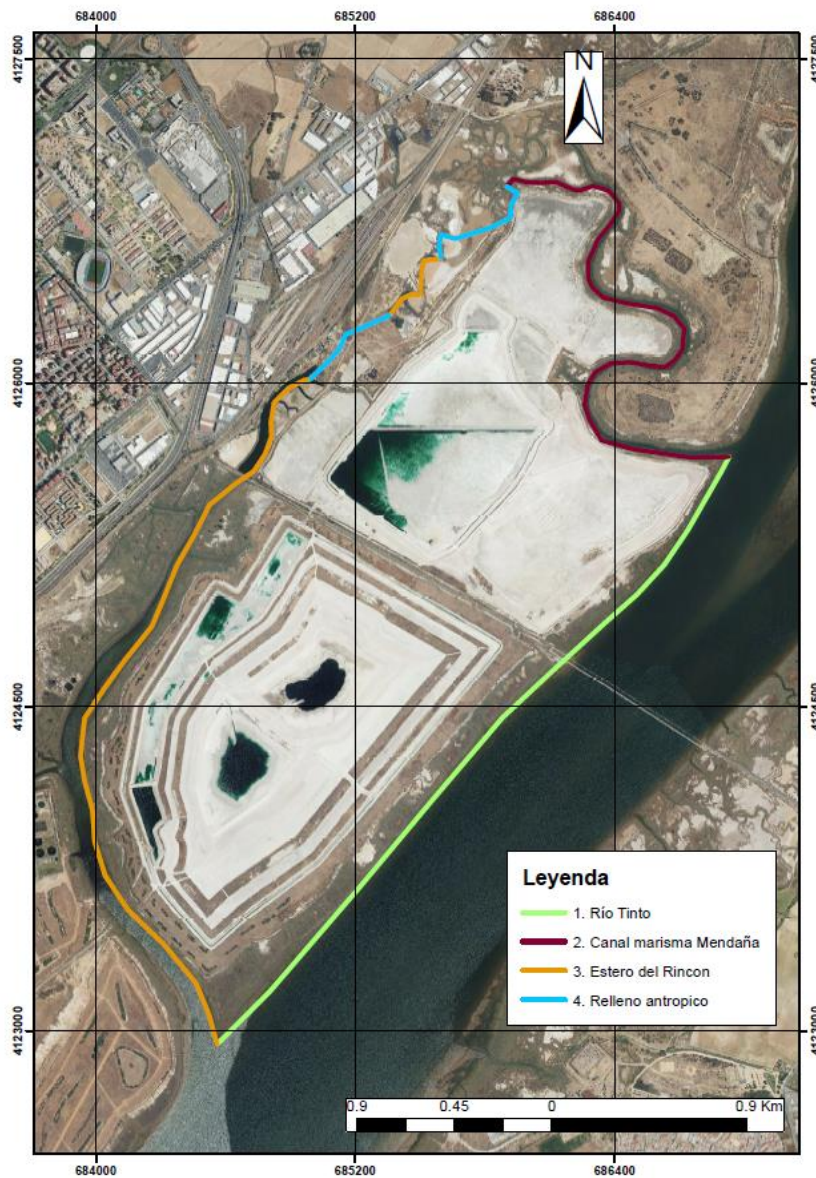


Figura 6. Límites del modelo numérico.

Discretización horizontal

La discretización supone dividir el dominio de modelación en una serie de elementos individuales donde el código resuelve la ecuación de flujo. En el caso de FEFLOW, por tratarse de un método de elementos finitos, la ecuación se resuelve en los vértices (nodos) de dichos elementos. Teóricamente, el error cometido por el modelo crece con el tamaño de los elementos. Por lo tanto, cuanto menores sean los elementos, menores serán los errores numéricos asociados a la función interpolada (en este caso los niveles piezométricos). Sin embargo, tampoco es conveniente usar elementos demasiados pequeños ya que el tiempo de cálculo depende del número total de elementos. Por lo tanto, es necesario buscar el equilibrio entre el tamaño de elementos (error del modelo) y el tiempo de cálculo.

La malla se ha generado con el preprocesador de FEFLOW v. 7.4 siguiendo los siguientes criterios:

- La malla se adapta a los contornos
- La malla se adapta a zonas de diferentes parámetros
- La malla se adapta a los elementos hidrogeológicos del sistema (balsas, canales de marea, drenes, pozos, etc.)

Con esta configuración, el dominio ha quedado dividido en 745.040 elementos y 214.038 nodos. Los elementos son prismas triangulares. El tamaño promedio de los elementos es de 20 m (Figura 7). Las zonas de particular interés, como los canales mareales, o zonas con elementos hidráulicos muy cercanos han sido refinadas para minimizar los errores de cálculo, obteniendo así, un tamaño promedio de elemento de 8 m en las zonas refinadas.



Figura 7. Malla del modelo numérico.

Discretización vertical

Los fosfoyesos (FYS) están depositados sobre la zona más superficial de la marisma (E6), ambos conforman la capa 1 del modelo. La unidad E6, que pertenece al Complejo Estuarino, se implementa con las capas 2 y 3 del modelo. Han sido necesarias 2 capas para simular la

unidad E6 para poder implementar de una forma realista la condición de contorno de tipo goteo o Cauchy. Estas capas tienen un espesor total de 1 m.

La capa 4 representa la unidad E4-E5, constituida por limos arcillosos y arcillas limosas, con un espesor que va incrementándose de NW a SE, de 5 a 10 m, respectivamente.

Las arenas intermedias, unidad E3, constituyen un acuífero confinado y se simulan con la capa 5 del modelo. Esta capa tiene un espesor máximo es de 6 m en la sección central de las balsas principales de la zona 2, mientras que se acuña en sentido NW-SE. Los sectores de la capa donde no hay continuidad de la unidad E3, se simulan con los mismos parámetros que la unidad E4-E5.

La capa 6 corresponde a la última unidad del Complejo Estuarino, unidad E1-E2, compuesta por limos arcillosos, limos arenosos y arenas limosas con espesores que van desde los 4-5 m en el sector NW a 15 m en el sector SE.

Las capas 7 y 8 pertenecen a la unidad “Niveles Detríticos Inferiores”, que engloba las unidades PT2v y PT2a + F2. La unidad PT2v está compuesta por limos arenosos y solo se halla en el sector NW del área de estudio. Esta unidad se representa con parte de la capa 7. El resto de la capa, y la capa 8 representan las unidades PT2a y F2. Estas unidades las integran gravas con alta conductividad hidráulica y tienen un espesor promedio de 8 m.

La Figura 8. Arriba: perfil transversal a las balsas NE y SE. Abajo: perfil longitudinal de las zonas 2 y 3. refleja la discretización vertical del modelo según dos cortes verticales, uno transversal a las balsas, perfil 4, y otro longitudinal perfil B.

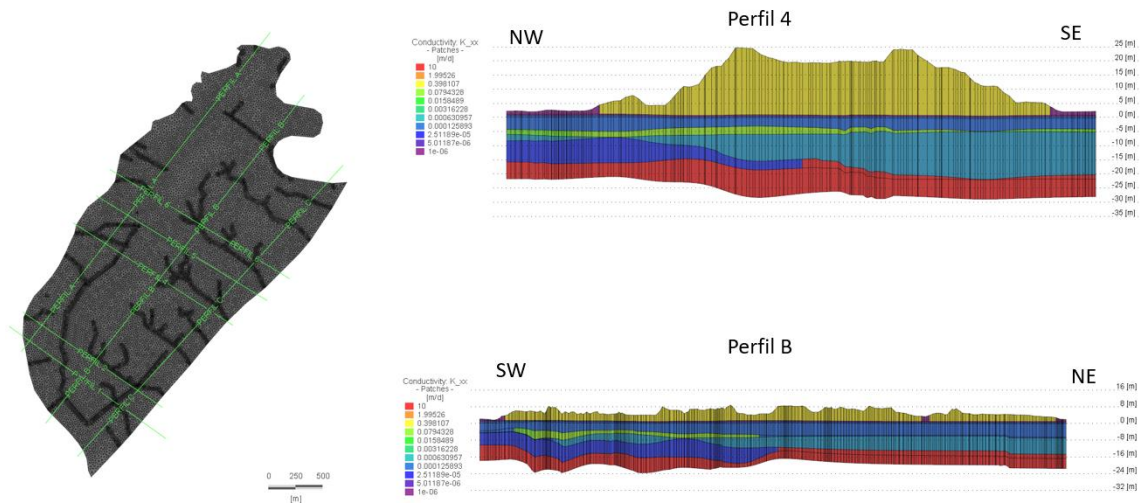


Figura 8. Arriba: perfil transversal a las balsas NE y SE. Abajo: perfil longitudinal de las zonas 2 y 3.

Parametrización hidráulica

Los parámetros hidráulicos han sido asignados a las diversas zonas que representan un comportamiento homogéneo. La geometría de las zonas pretende reproducir las variaciones geológicas y de parámetros hidráulicos de las unidades. Los valores que se dan como entrada al modelo son una hipótesis previa, que después, durante el proceso de calibración, se podrán modificar (dentro de unos umbrales coherentes) para permitir un mejor ajuste entre los datos piezométricos calculados por el modelo y los datos medidos en los puntos de observación.

Se han definido 8 zonas de conductividad hidráulica, distribuidas en las distintas capas del modelo. Los valores de partida se han definido en la sección de parámetros hidráulicos del modelo conceptual, donde se explica cómo se han llegado a esos valores. El modelo numérico considera la anisotropía en la vertical, siendo la conductividad hidráulica vertical (K_{zz}) un orden de magnitud menor respecto la horizontal ($K_{xx}=K_{yy}$). La distribución de la conductividad hidráulica y los valores de referencia iniciales se pueden ver en las Figura 9, Figura 12, Figura 11, Figura 12 y en la Tabla 8.

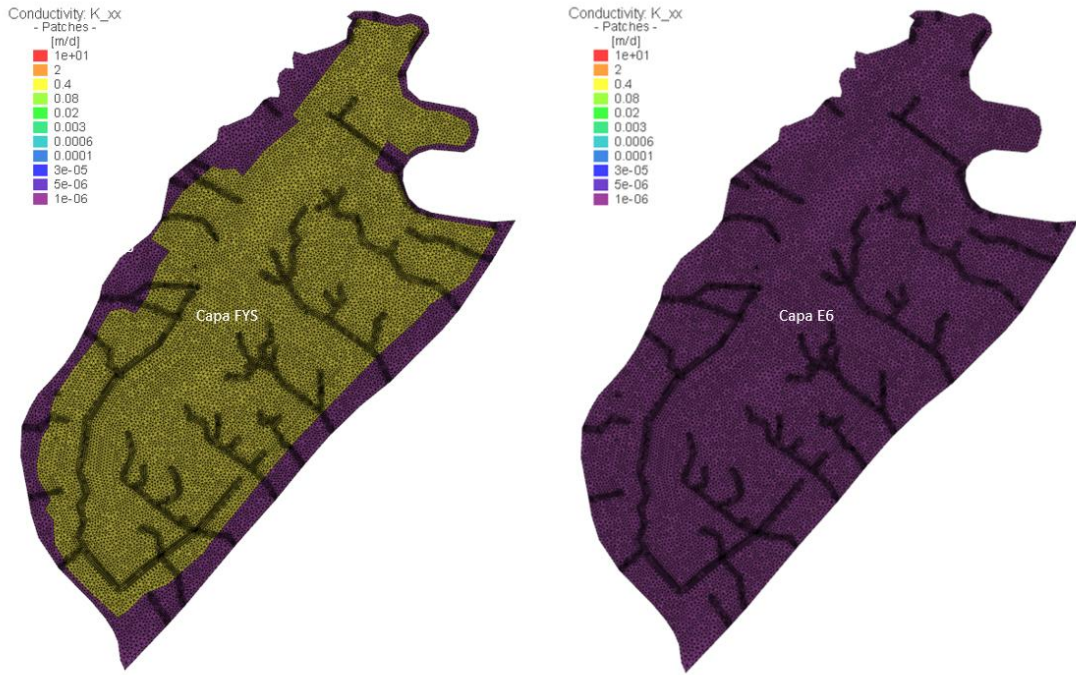


Figura 9. Parametrización hidráulica horizontal capas 1, 2 y 3.

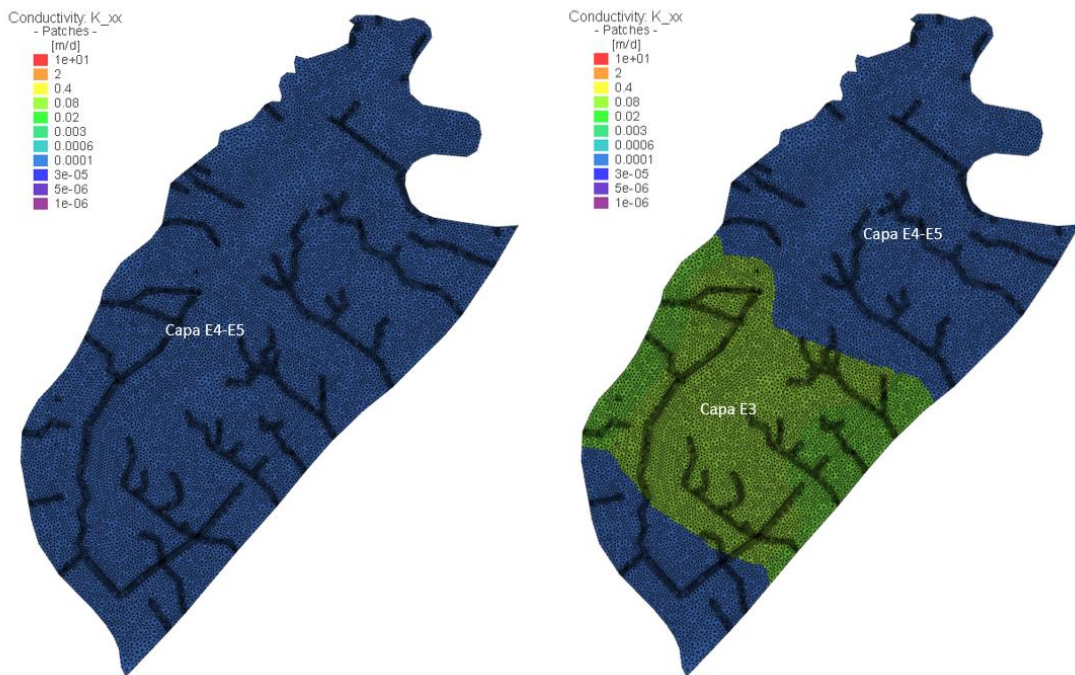


Figura 10. Parametrización hidráulica horizontal capas 4 y 5.

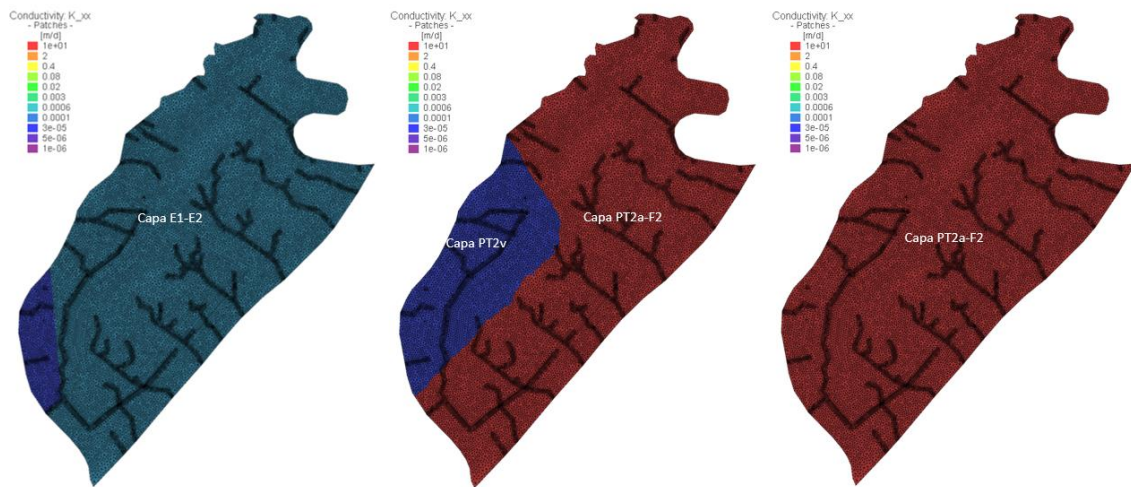


Figura 11. Parametrización hidráulica horizontal capas 6, 7 y 8.

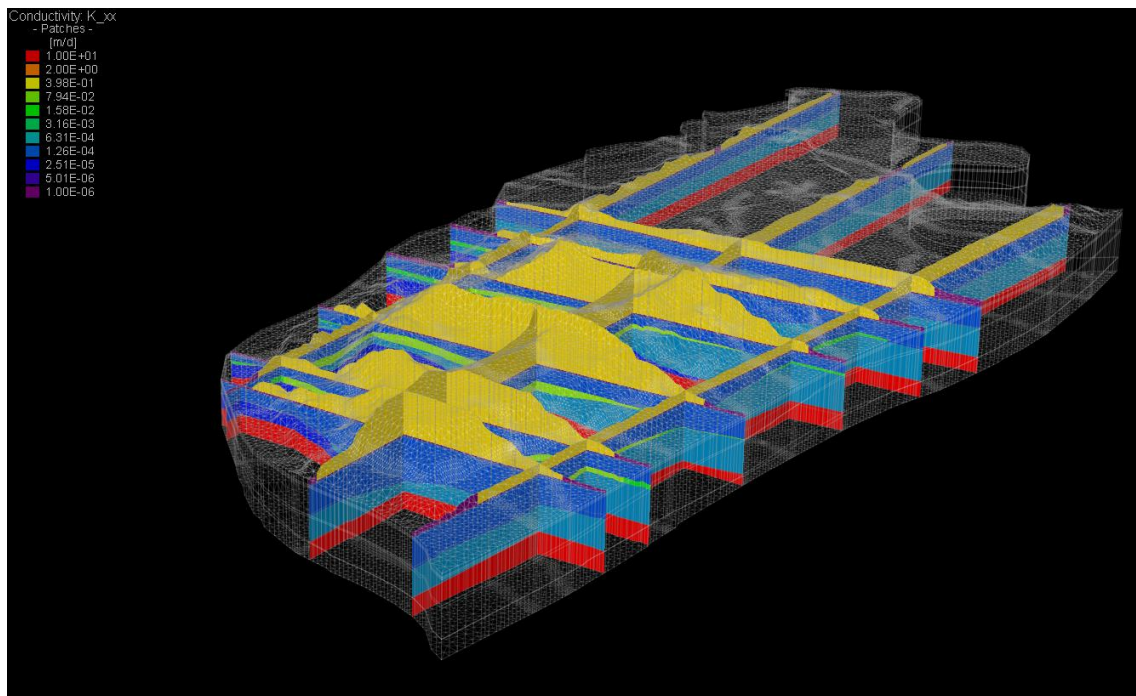


Figura 12. Vista 3D de la parametrización hidráulica.

Tabla 8. Parámetros hidráulicos de entrada.

Unidad	Conductividad hidráulica horizontal (m/d)	Conductividad hidráulica vertical (m/d)
FYS	0.1	0.01
E6	1E ⁻⁵	1E ⁻⁶
E5-E4	1E ⁻⁵	1E ⁻⁶
E3	1	0.1
E2-E1	0.027	0.0027
PT2v	8.64E ⁻⁵	8.64E ⁻⁶
PT2a – F2	50	5

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son aquellas que permiten definir las características físicas reales o deducidas en los límites del modelo. Se pueden diferenciar condiciones de nivel fijo o *Dirichlet*, cuando el nivel piezométrico y sus posibles variaciones son suficientemente bien conocidas, y de caudal fijo o *Neumann* cuando es el flujo lo que se puede llegar a cuantificar. En todo caso, conviene considerar también las condiciones mixtas (goteo) o *Cauchy*, en las que se fija una relación lineal entre el nivel en el acuífero y el flujo que atraviesa el contorno. El tipo de condiciones de contorno que se han considerado para el modelo numérico son las siguientes:

Flujo nulo (tipo *Neumann*)

Se ha considerado como flujo nulo todas aquellas zonas del modelo donde se justifica la no existencia de flujos de entrada lateral, siendo esta la que se presenta como defecto en los programas de modelación.

El sector con este tipo de condición impuesta corresponde a los límites NW de la zona 3 en la *slice 1* del modelo, donde los canales del estero del Rincón han sido sepultados con relleno antrópico.

Condición de goteo (tipo Cauchy)

La condición de goteo se ha aplicado específicamente para representar las salidas de borde a través de los canales mareales y río Tinto y esteros del Rincón y Mendaña (Figura 13). Para obtener la cota de nivel piezométrico se ha interpolado el valor de la cota desde la cabecera del canal (aproximadamente 2 m.s.n.m) hasta el río Tinto y esteros del Rincón y Mendaña (alrededor de 1.7 m.s.n.m). El coeficiente de goteo que se ha considerado es de 0.02 1/d.



Figura 13. Condición de goteo o tipo Cauchy (verde), se aplica sobre los nodos.

Nivel Fijo (tipo *Dirichlet*)

La condición de nivel fijo se ha aplicado para las balsas NW, SW, Regulación y Emergencia, los canales perimetrales, drenes y contornos del río Tinto, esteros del Rincón y Mendaña (Figura 14).

El nivel fijo corresponde con el valor de cota topográfica de la lámina de agua, estos valores han sido obtenidos de la bibliografía (Fertiberia, 2014).

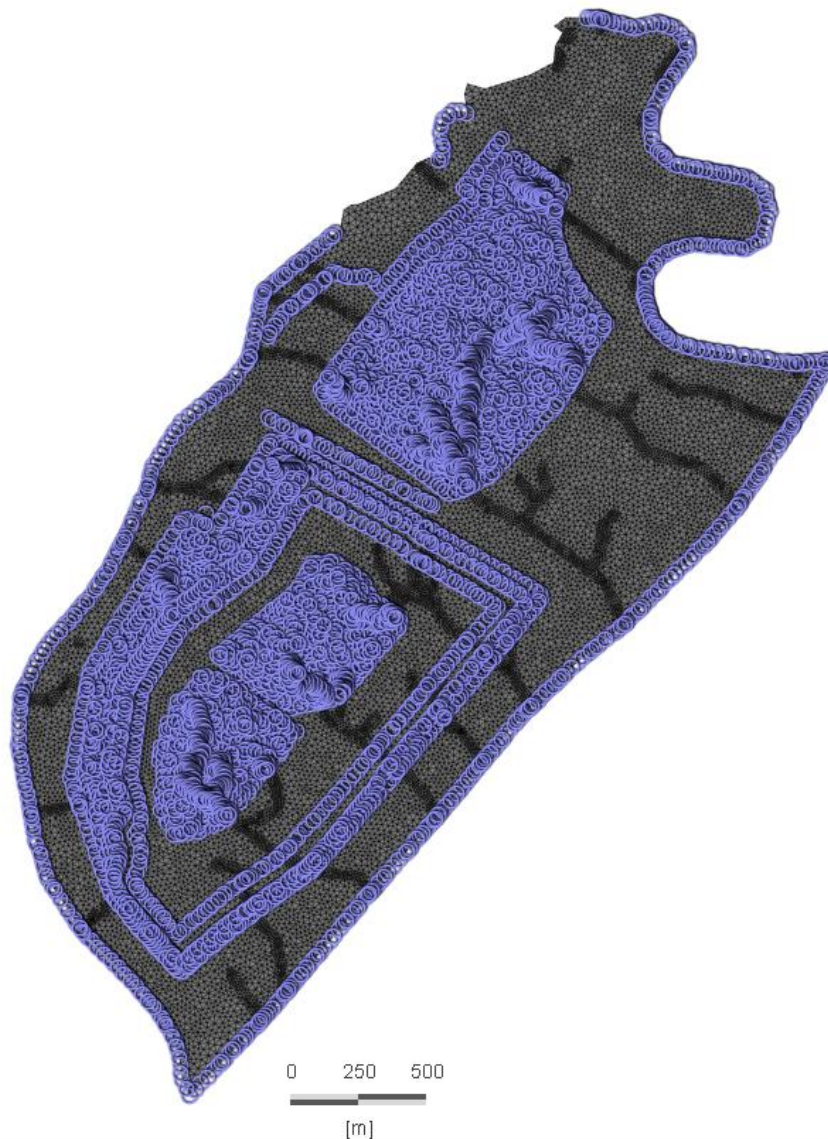


Figura 14. Condiciones de contorno tipo nivel fijo.

Puntos de observación

Los puntos de medida considerados corresponden a aquellos de los que se disponen de datos fiables para los periodos comprendidos desde el 01-07-2009 al 01-02-2010 y desde el 01-09-2015 al 23-11-2015. Los datos de nivel utilizados en la calibración corresponden al valor medio observado durante cada periodo en cada punto. En caso de valores anómalos, se ha tomado una decisión arbitraria para determinar su valor. Cabe señalar que los puntos de observación no son los mismos en cada uno de los periodos de monitoreo.

Se utilizaron un total de 66 puntos de observación para la calibración del modelo en régimen (Figura 15). Estos están ranurados a diferentes profundidades, y, por lo tanto, aportan información sobre el nivel piezométrico en diferentes unidades (fosfoyesos, marisma, y niveles detríticos inferiores).

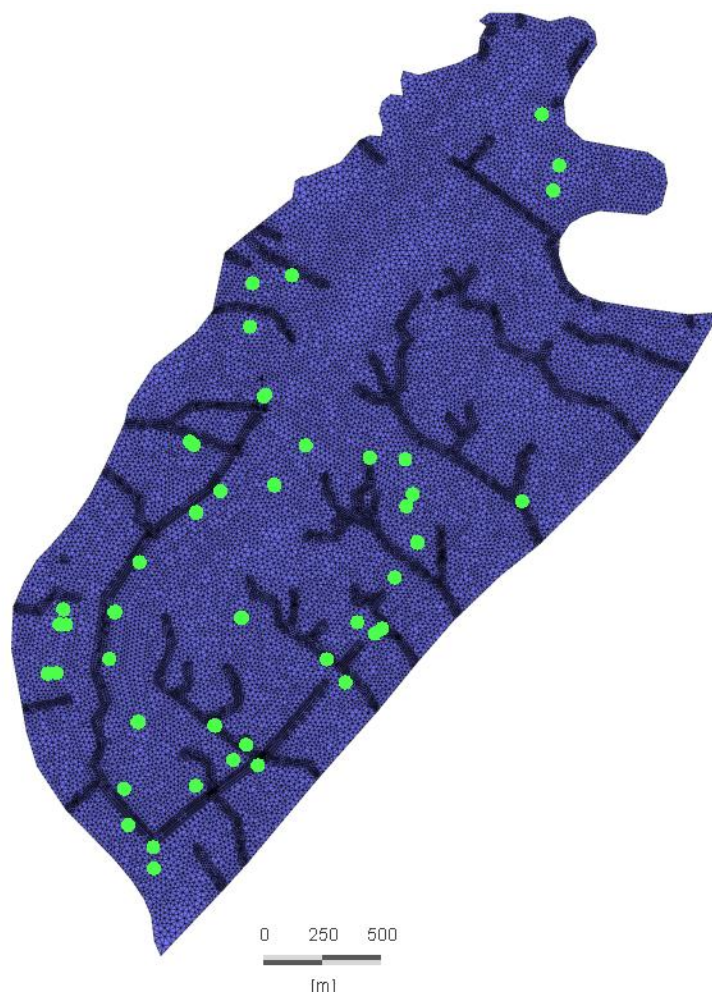


Figura 15. Distribución de los puntos de observación

Calibración modelo estacionario

El objetivo de la calibración es reproducir las variables observadas, que en el presente trabajo se corresponden con los niveles piezométricos en los puntos de observación (Figura 15). La calibración ha permitido ajustar los valores iniciales de conductividad hidráulica (Tabla 8).

Las conductividades hidráulicas calibradas, tanto horizontales como verticales, son valores realistas y que se ajustan a los rangos típicos de los materiales representados (Tabla 9). En términos generales, la unidad acuífera de los fosfoyesos presenta valores de permeabilidad medios, lo cual es coherente con los procesos de karstificación que ocurren en los mismos, debido a su alta solubilidad. Dentro del Complejo Estuarino, las unidades E1-E2 y E4-E4 tienen valores muy bajos de conductividad hidráulica, coherente con su litología y su comportamiento como acuitardo. La unidad E3 (unidad arenosa) actúa como un acuífero confinado, con una conductividad hidráulica media. Por último, las unidades PT2a y F2 de los Niveles Detríticos Inferiores, que están compuesta por gravas, son las que presentan una conductividad hidráulica más elevada. La unidad PT2v tiene poca extensión horizontal y presenta una muy baja conductividad hidráulica.

Tabla 9. Conductividad hidráulica calibrada

Unidad	K_{xx}, K_{yy} (m/d) de entrada	K_{xx}, K_{yy} (m/d) calibrada	K_{zz} (m/d) de entrada	K_{zz} (m/d) calibrada
FYS	0.1	0.5	0.01	0.05
E6	$1E^{-5}$	$1E^{-6}$	$1E^{-6}$	$1E^{-7}$
E5-E4	$1E^{-5}$	$1E^{-4}$	$1E^{-6}$	$1E^{-5}$
E3	1	0.1	0.1	0.01
E2-E1	0.027	0.0003	0.0027	0.00003
PT2v	$8.64E^{-5}$	$3.5E^{-5}$	$8.64E^{-6}$	$3.5E^{-6}$
PT2a – F2	50	10	5	1

Una vez se llega a unos resultados que se pueden considerar aceptables, se concluye el proceso de calibración. Para objetivar la bondad de estos resultados se determinan una serie

de parámetros estadísticos relativos al ajuste del modelo en términos de comparación de los datos de nivel medidos y calculados. Los estadísticos para cuantificar la bondad del ajuste del modelo son los siguientes:

- Numero de pozos: 66
- Error medio absoluto (MAE): 1,44
- Raíz del error cuadrático medio (RMS): 2,48
- Desvío estándar: 2,5
- Raíz del error cuadrático medio normalizado (RMS_N): 5%

A la vista de los estadísticos se considera que el resultado del modelo es adecuado en cuanto ajustes se refiere (Figura 16).

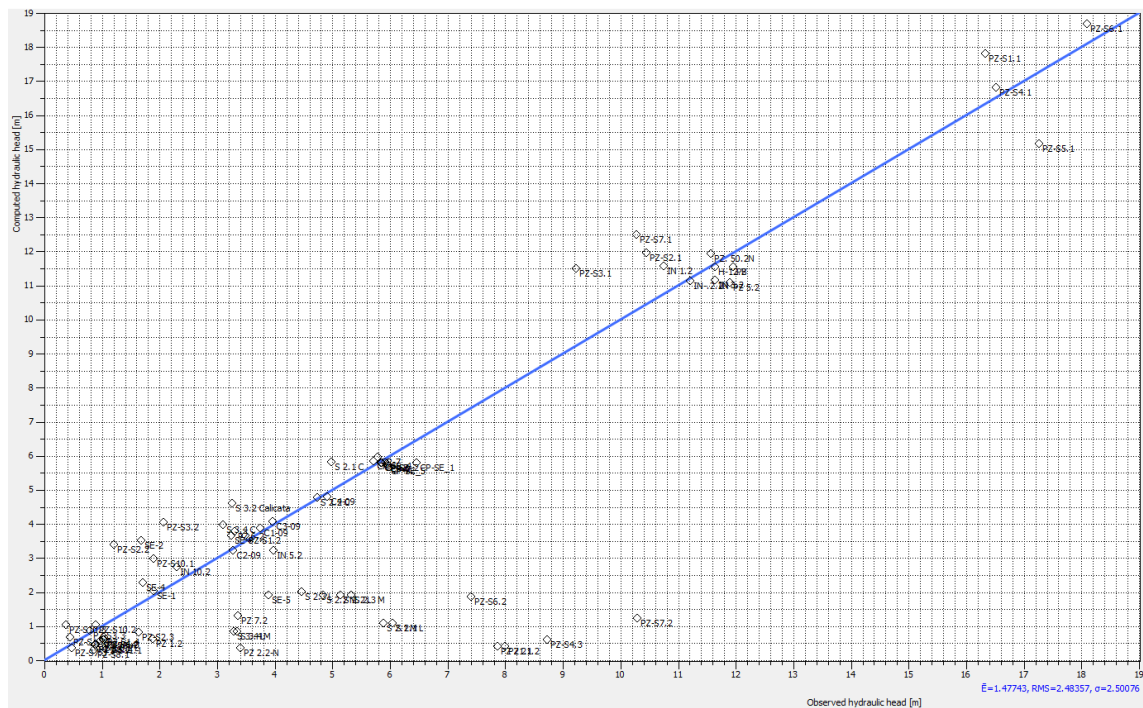


Figura 16. Ajuste entre niveles piezométricos observados vs calculados.

Piezometría

Esta sección muestra las piezometrías resultantes de la simulación del modelo estacionario en las unidades de los fosfoyesos (Figura 17) y la unidad de E6 (Figura 18).

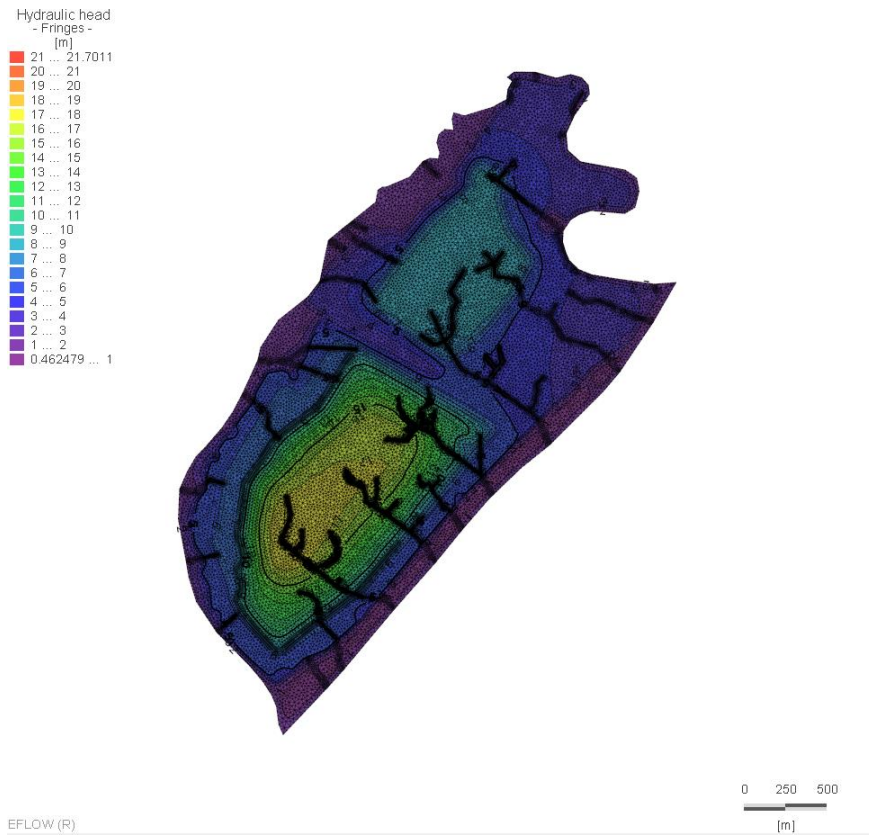


Figura 18. Piezometría de la unidad superficial de la marisma, E6.

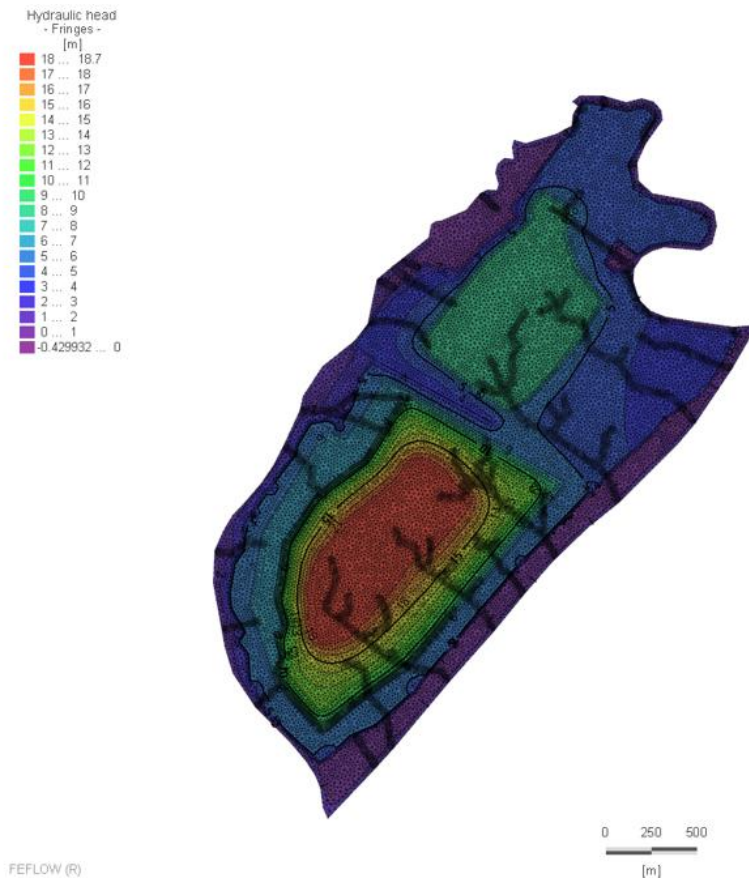


Figura 17. Piezometría de la unidad de fosfoyesos.

Las isopiezas correspondientes a la unidad de los fosfoyesos (Figura 17) reflejan como el flujo va desde las zonas de recarga, balsas principales, hacia el contacto entre la misma unidad y la unidad más superficial de la marisma (E6), donde descarga a través de los canales de marea. En la unidad de la marisma (E6) puede observarse como el drenaje ocurre a través de los canales mareales, esto es coherente con los puntos pertenecientes a las salidas de borde.

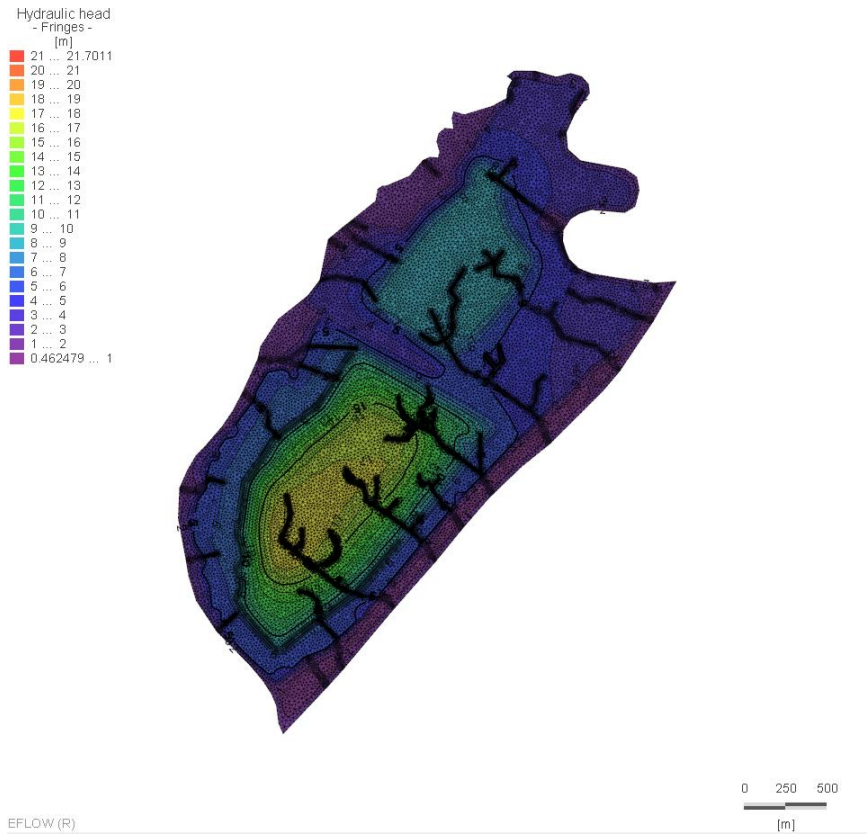


Figura 18. Piezometría de la unidad superficial de la marisma, E6.

Balance hídrico

En la Tabla 10 y Figura 19 se resume el balance hídrico global para el modelo estacionario.

Tabla 10. Balance hídrico modelo numérico.

Balsas NW y SE	Balsa Regulación	Balsa Emergencia	Drenes	Canales mareales	Evaporación
1250 m ³ /d	200 m ³ /d	900 m ³ /d	800 m ³ /d	-450 m ³ /d	-2700 m ³ /d
3150 m³/d				3150 m³/d	

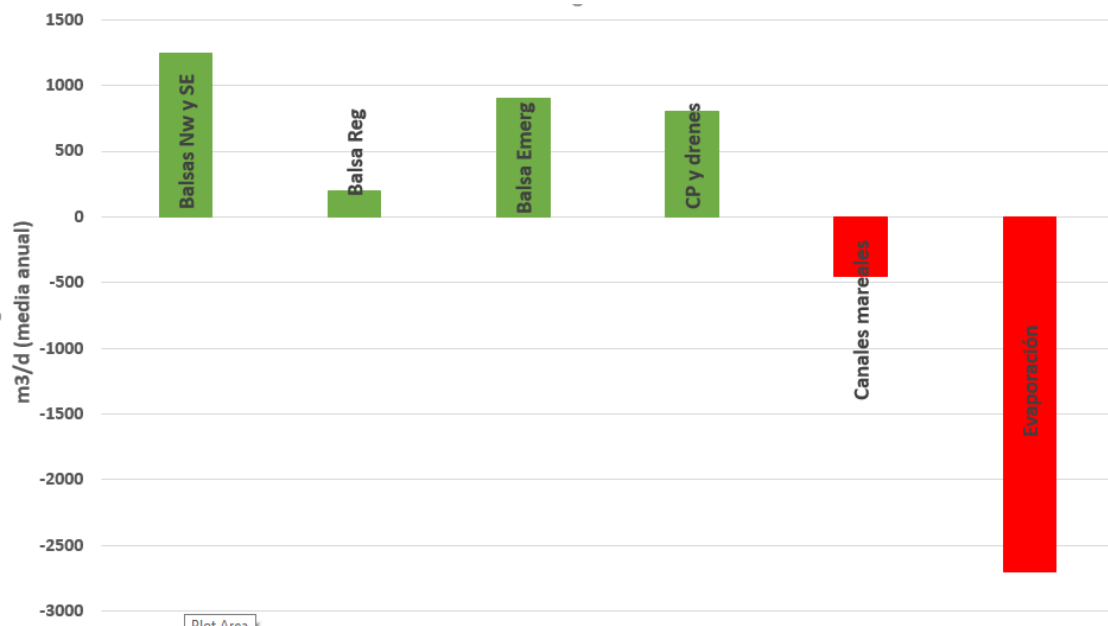


Figura 19. Diagrama de barras de las entradas y salidas

En los diagramas de barras del balance se observa claramente que los términos principales de entrada y salida son respectivamente las balsas y los canales mareales (salidas de borde). El resto de las entradas, con valores mucho menores son los drenes y canales perimetrales.

RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados del trabajo realizado. Esta tarea se aborda analizando paso a paso los resultados obtenidos en términos de parámetros finales calibrados frente a información previa y balance de masas.

El resultado piezométrico obtenido en el modelo estacionario natural constituye una condición estática del sistema hidrogeológico de las balsas de fosfoyesos y su entorno, es decir, en su situación operacional y bajo condiciones promedio de recarga y evaporación. Este escenario permite alcanzar dos objetivos: (1) sustentar cuantitativamente el modelo conceptual establecido previamente, permitiendo justificar el comportamiento hidráulico general del sistema y (2) disponer de una piezometría de partida para realizar futuros escenarios de gestión hídrica.

El resultado del modelo estacionario muestra una piezometría donde se observan claramente las zonas de recarga y descarga del sistema. En general, las zonas de recarga son las balsas principales en la zona 2 y la balsa de emergencia en la zona 3. Las descargas se producen hacia las salidas de borde coincidiendo con los canales de marisma situados por debajo de los depósitos de fosfoyesos.

Las descargas de las balsas principales son hacia los esteros del Rincón, río Tinto y hacia el drenaje entre las zonas 2 y 3. El mayor gradiente es de 0,032 y es hacia el río Tinto, mientras que en la dirección NE el gradiente es menor porque la balsa de regulación intercepta gran parte del flujo. Estas descargas se canalizan por los canales mareales de la marisma, también conocidas como salidas de borde en el contacto entre los fosfoyesos y la marisma.

Desde el punto de vista hidráulico, la unidad de fosfoyesos tiene una conductividad hidráulica media. Las unidades de la marisma, actúan como acuitardo y presentan valores de conductividad hidráulica muy bajos. La única excepción es la unidad E3 que tiene una conductividad hidráulica media y se comportan como un acuífero confinado. Por último, las unidades detríticas inferiores son las que presentan una mayor conductividad hidráulica.

El balance hídrico calculado numéricamente es comparable con el estimado mediante el modelo conceptual inicial. Los valores estimados para las entradas y salidas son un poco mayores que los obtenidos con el modelo numérico, lo que es debido a la incertidumbre que existe en los aforos de las salidas de borde.

Como síntesis, cabe decir que el modelo reproduce adecuadamente los niveles piezométricos observados, los parámetros calibrados son coherentes, reproduce adecuadamente el balance de masas calculado de forma analítica.

CONCLUSIONES

Se ha realizado el modelo numérico de flujo de agua subterránea de las balsas de fosfoyeso y su entorno dentro del “Proyecto de Investigación: Caracterización y modelación hidrogeológica de las balsas de fosfoyesos y su entorno”.

Para ello, se ha recopilado y analizado un gran número de antecedentes respecto a la geología, hidrogeológica, hidrología, hidroquímica y modelación de estudios realizados en las balsas de fosfoyesos por parte de consultores externos, publicaciones en revistas científicas y trabajos universitarios.

Se ha integrado toda la información disponible para realizar el modelo conceptual hidrogeológico en régimen estacionario correspondiente al estado operacional. El resultado es un balance hidrogeológico que contempla la recarga por precipitaciones y bombeos vertidos en las balsas, y también las salidas del sistema, como la evaporación y las salidas de borde.

El modelo es a escala local (6 Km²) y su geometría tridimensional reproduce las unidades hidrogeológicas descritas en el apartado del modelo conceptual del presente informe. El modelo queda limitado por el río Tinto y los esteros del Rincón y Mendaña. La estructura del mismo consta de 8 capas que simulan las unidades hidrogeológicas definidas. Los elementos son del tipo prismático triangular con 6 nodos. Finalmente, el dominio ha quedado definido por más de 350.000 elementos y 200.000 nodos. Se han asignado condiciones de contorno y una zonificación de parámetros coherentes con la zonificación y geometrías mencionadas.

Los resultados obtenidos son satisfactorios en todos los aspectos considerados en la calibración: ajustes de niveles, coherencia paramétrica dentro de los rangos previstos y coherencia con el modelo conceptual y balances previos.

El uso de este modelo debe entenderse a escala regional. Es un modelo que reproduce adecuadamente las tendencias generales del conjunto del sistema hidrogeológico de las

balsas de fosfoyesos y por tanto constituye una herramienta eficaz de apoyo en la gestión ambiental de la zona de estudio

REFERENCIAS:

- Aqva Onobensis. El acueducto de Onoba Aestvaria (2020). Capítulo 2: Contexto hidrogeológico de los cabezos de Huelva y el antiguo sistema de abastecimiento de agua. Universidad de Huelva. Monografía.
- Diersh, H.J.G., 2014. FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. <https://doi.org/10.100007/978-3-642-38739-5>.
- Doherty, J., 2015. Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia. ISBN: 978-0-9943786-0-6.
- Fertiberia S.A (2018). Adenda. Proyecto constructivo. Clausura de las balsas de fosfoyesos situadas en el término municipal de Huelva. Tomo II. Anejo 5: estudio hidrogeológico año hidrogeológico completo.
- Fertiberia S.A (2014). Proyecto constructivo. Clausura de las balsas de fosfoyesos situadas en el término municipal de Huelva. Tomo III. Anejo 2: estudio hidrogeológico.
- Pérez-López, R., Castillo, J., Sarmiento, A., Nieto J. (2011). Assessment of phosphogypsum impact on the salt-marshes of the Tinto river (SW Spain): Role of natural attenuation processes. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 2787-2796. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.008>.
- Marazuela, M.A, Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A. (2019). Towards more sustainable brine extraction in salt flats: Learning from the Salar de Atacama. *Science of the Total Environment*, 703, 135605. <https://doi.org/10.1016/j.scitoetenv.2019.135665>.
- Pérez-López, R., Nieto, J., de la Rosa, J., Bolívar, J. (2015). Environmental tracers for elucidating the weathering process in a phosphogypsum disposal site: Implications for restoration. *Journal of Hydrology*, 519-3, 1313-1323. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.056>.

- Pérez-López, R., Macías, F., Ruiz Cánovas, C., Sarmiento, A, Pérez-Moreno, S. (2016). Pollutant flows from a phosphogypsum disposal areas to an estuarine environment: An insight from geochemical signatures. *Science of the Total Environment*, 553, 42-51. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.070.