



PROYECTO

MEJORA DE LA RESTAURACIÓN DE LA ZONA 4 FERTIBERIA (HUELVA)



ANEJO 3: GEOFÍSICA

Propiedad: Fertiberia S.A.



Ingeniería: Eptisa Servicios de Ingeniería S.L.



Fecha: Junio de 2022

Índice

ANEJO 3: GEOFÍSICA

1. Objeto y alcance del documento	3
---	---

1. Objeto y alcance del documento

En el presente Anejo se incorpora los resultados de la campaña geofísica mediante tomografía eléctrica para la caracterización del subsuelo de la zona 4 de los apilamientos de fosfoyesos.

Huelva, Junio de 2022



**CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE
TOMOGRFÍA ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL
SUBSUELO EN LAS MARISMAS DE MENDAÑA (HUELVA).**

Abril 2021



ÍNDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
2. METODOLOGÍA.....	4
3. TRABAJO REALIZADO	6
4. RESULTADOS	8
5. CONCLUSIONES	12

ANEXOS

- ANEXO I: Mapa de situación de perfiles de tomografía eléctrica
- ANEXO II: Perfiles de tomografía eléctrica
- ANEXO III: Resultados
- ANEXO IV: Fotografías

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ANÁLISIS Y GESTIÓN DEL SUBSUELO, S.L. ha realizado, por encargo de EPTISA, una campaña de prospección geofísica mediante perfiles de tomografía eléctrica para la caracterización del subsuelo en las Marismas de Mendaña, en las instalaciones de Fertiberia (Huelva).

El propósito del presente trabajo es caracterizar las diferentes unidades que se encuentran en la zona de estudio. Se pretende conocer el espesor de cada unidad y la influencia del nivel freático y las mareas sobre las marismas de Mendaña debido al asentamiento de las mismas.



Figura 1. Localización de la zona de estudio (Área amarilla).

La información que se presenta en este informe comprende la descripción de los trabajos realizados, la explicación de la metodología desarrollada y la valoración de los principales resultados que se han obtenido de la campaña de prospección geofísica.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se describe a continuación el método prospectivo empleado: La tomografía eléctrica. Se trata de un método prospectivo geoelectrico que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico, es decir, diferenciador de los mismos en función de su valor de resistividad.

La naturaleza y composición de las rocas, la textura más o menos alterada o más o menos porosa unida al contenido en fluidos son factores que van a condicionar la existencia de una mayor o menor concentración de iones. Una mayor movilidad de estos iones tiene como consecuencia una mayor conductividad o, lo que es lo mismo, una menor resistividad.

La resistividad de las rocas depende, fundamentalmente, de cuatro factores:

- *De la proporción de volumen de poros frente a volumen total de la roca.* A priori, a mayor volumen de poros (porosidad) puede esperarse una menor resistividad, siempre y cuando la porosidad tenga un relleno (agua, arcilla, etc.). Si no es así (caso de cuevas o galerías con aire), la resistividad debería ser anormalmente alta dado el carácter dieléctrico del aire.
- *De la disposición geométrica de dichos poros (denominado factor de formación).* A mayor conexión de poros, si están rellenos de agua, implica una menor resistividad ya que la movilidad de fluidos y de iones es más fácil. Si tienen una morfología poco alargada o su disposición condiciona que estén desconectados, la resistividad será, por el contrario, mayor.
- *De la proporción de poros rellenos de agua frente a poros secos.* A mayor proporción de poros rellenos de agua, la resistividad va a ser menor pues el agua permite una mayor circulación de la corriente eléctrica que el aire, que es un dieléctrico.
- *De la resistividad o conductividad de dicha agua.* A mayor conductividad del agua, menor será la resistividad de la formación que la contiene.

Los diferentes factores que afectan a la resistividad de una roca se agrupan en la siguiente fórmula de Heiland:

$$\rho = \frac{F}{V} \times \rho_w$$

Donde,

- ρ es la resistividad de la roca impregnada.
- ρ_w es la resistividad del agua contenida en la roca.
- v es el volumen relativo de huecos (factor de porosidad) que depende de la textura de la roca; es cero en roca compacta y aumenta con la porosidad.
- F factor de formación, que depende de la forma y distribución de los poros.

A esta fórmula habría que añadir un factor de saturación (F_s) que depende de la proporción en que los poros de la roca están rellenos de agua. Esto transformaría la fórmula anterior en la siguiente:

$$\rho = \frac{F}{V} \times \rho_w \times \frac{1}{F_s}$$

En la zona de saturación, por debajo del nivel freático, el F_s es 1 ya que todos los poros están rellenos de agua. En este caso, ambas fórmulas son iguales. Por encima de este nivel, el F_s va a depender de la capacidad de la roca de almacenar agua. Por ejemplo, para las gravas y arenas gruesas es desde 0.01 hasta 0.40 y para rocas capaces de almacenar agua por capilaridad (arcillas), hasta 0.60. El caso extremo es el desierto en una época calurosa, donde F_s vale 0, lo que obliga, en el caso de la prospección eléctrica, a clavar mucho los electrodos en el terreno hasta encontrar un nivel con un grado mínimo de humedad capaz de garantizar el paso de la corriente. Esta actividad se puede complementar con otras actuaciones capaces de mejorar la unión eléctrica con el terreno, como, por ejemplo, el vertido de agua, a ser posible salada, junto a los electrodos, o la colocación de 2 ó 3 electrodos de corriente en cada punto de medición, etc.

Estos aspectos teóricos son los que dan la pauta de comportamiento a los diferentes materiales. La ejecución de una campaña de prospección geoeléctrica mediante tomografía permitirá la determinación de diferentes valores de resistividad que, por atribución, permitirá identificar unidades litológicas de distinta naturaleza (arcillas, margas, calizas, etc.), aspectos estructurales (fallas, pliegues) y geomorfológicos (cuevas y rellenos), etc.

3. TRABAJO REALIZADO

El trabajo realizado ha consistido en la realización de cuatro (4) perfiles de tomografía eléctrica (ver figura 2 y Anexo I de situación).



Figura 2. Localización de la los perfiles de tomografía eléctrica en la zona de estudio.

Los perfiles tienen las siguientes características:

PERFILES 1 Y 2:

- Longitud de cada perfil: 895 m
- Separación entre electrodos: 5 m
- Número de electrodos por perfil: 180
- Número de cuadripolos de medida por perfil: 18.252
- Profundidad máxima de investigación: 70 m

PERFIL 3:

- Longitud de cada perfil: 355 m
- Separación entre electrodos: 5 m
- Número de electrodos por perfil: 72
- Número de cuadripolos de medida por perfil: 4.563
- Profundidad máxima de investigación: 70 m

PERFIL 4:

- Longitud de cada perfil: 535 m
- Separación entre electrodos: 5 m
- Número de electrodos por perfil: 108

- Número de cuadripolos de medida por perfil: 9.126
- Profundidad máxima de investigación: 70 m

En todos los perfiles se ha realizado un posterior trabajo de reprocesado en gabinete. Este trabajo es doble. Por un lado, se han reprocesado los perfiles tras la introducción de la altitud de los electrodos, para tener un perfil topográfico de cada perfil. Para ello se ha considerado la topografía que ofrece la herramienta Google Earth.

Los perfiles se han medido con doble dispositivo de medida, tanto Schlumberger-Wenner como Dipolo-Dipolo y, posteriormente, se han realizado un reprocesado de cada perfil mediante la suma de los resultados de ambos dispositivos con el fin de obtener un perfil mixto de cada emplazamiento ya que la combinación de ambos generalmente es la más adecuada para identificar zonas anómalas y delimitar su posición. Hay que destacar que los perfiles 1 y 2 se han realizado con una escala vertical 1:2, con el objetivo de observar mejor los resultados.

4. RESULTADOS

Se describen a continuación los resultados principales que se han obtenido con la prospección geofísica del subsuelo mediante perfiles de tomografía eléctrica.

Los colores azulados y verdosos que se observan en todos los perfiles corresponden a los materiales más conductores, es decir, los materiales caracterizados por valores más bajos de resistividad. Sin embargo, los colores amarillos, pardos, naranjas y rojos corresponden a los materiales caracterizados por valores más altos de resistividad.

Los perfiles se han presentado con una regleta individualizada para cada perfil, con el objetivo de distinguir y diferenciar más claramente las diferentes unidades geoelectricas. Esto se debe a que la zona de estudio, debido a sus características litológicas, presenta unos reducidos rangos de resistividad.

4.1.- PERFIL 1

Características del emplazamiento: Orientación aproximada W-E, con inicio del perfil en el Oeste.

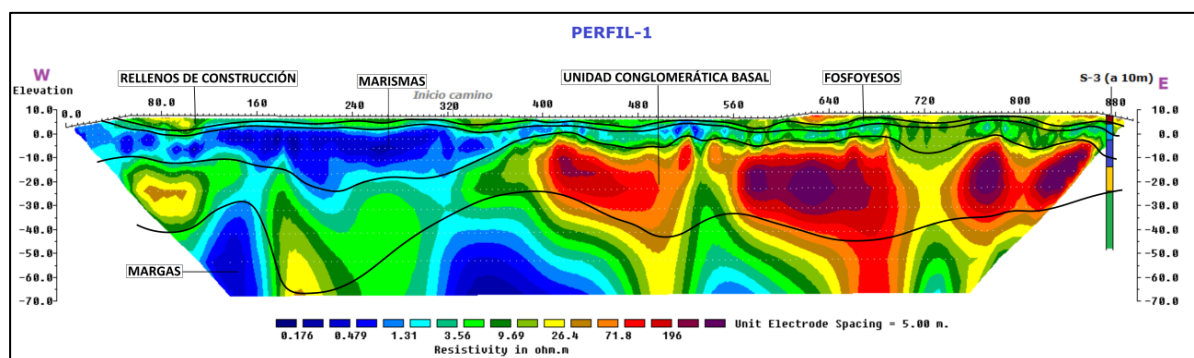


Figura 3. Perfil 1.

Características del subsuelo: Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en cinco unidades principales en función de sus valores de resistividad. La disposición de estas unidades en el subsuelo, desde la parte alta hasta la parte baja, es la siguiente:

- **RelLENOS de construcción:** Se observa en la parte superior de todo el perfil con un espesor medio variable entre 2 y 4 metros, si bien en algunos sectores aumenta de forma local hasta casi 7 metros. Tiene valores moderados de resistividad, que varían entre 50 y 200 Ohm x m.
- **Fosfoyesos:** La unidad de fosfoyesos presenta un espesor que varía entre 1 y 7 metros, mostrando las mayores potencias cerca del extremo Este. Los valores de resistividad observados son bajos, comprendidos entre 10 y 20 Ohm x m.
- **Marismas:** Por debajo de la unidad de fosfoyesos se encuentra la unidad más conductora, que se ha interpretado como Marismas. Presenta una morfología y unos espesores muy variables, comprendidos entre 5 y 30 metros. Los valores de resistividad que caracterizan esta unidad son muy bajos (1-10 Ohm x m).

- **Unidad Conglomerática Basal:** Formada principalmente por arenas y gravas muestra una morfología y unos espesores muy variables, comprendidos entre 15 y 40 metros. Los valores de resistividad observados en esta unidad son moderados-altos, comprendidos entre 50 y 300 Ohm x m, dependiendo de su mayor o menor contenido en arcilla, respectivamente, o dependiendo de su menor o mayor tamaño de los bolos, también respectivamente. Los valores de resistividad indican, en principio, que pueden tener un contenido en agua de calidad normal, ni salinizada ni contaminada.
- **Margas:** En la parte baja del perfil se presenta la unidad correspondiente a la unidad de margas. Presenta una morfología muy irregular debido al contacto erosivo basal de la unidad de conglomerados. Los valores observados en esta unidad son moderados-bajos, inferiores a 100 Ohm x m.

4.2.- PERFIL 2

Características del emplazamiento: Orientación aproximada NW-SE, con inicio del perfil en el NW.

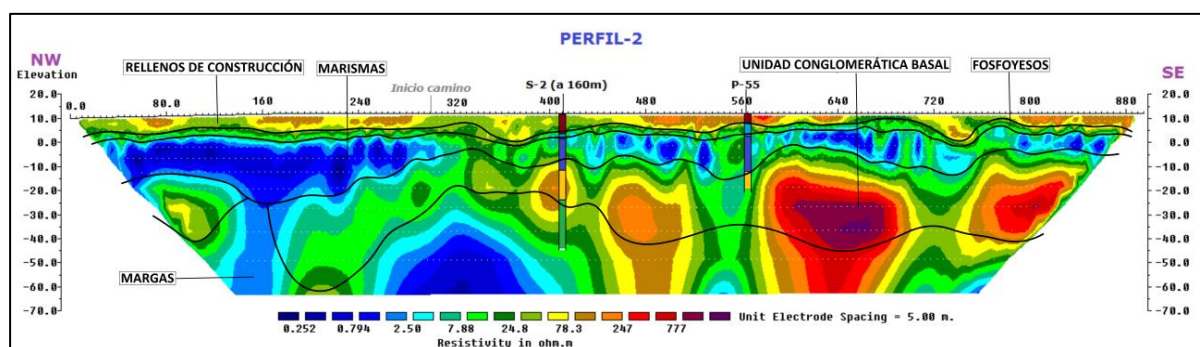


Figura 4. Perfil 2.

Características del subsuelo: Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en cinco unidades principales en función de sus valores de resistividad. La disposición de estas unidades en el subsuelo, desde la parte alta hasta la parte baja, es la siguiente:

- **Rellenos de construcción:** Se observa aflorando a lo largo de todo el perfil, con un espesor variable entre 4 y 6 metros, si bien en algunos sectores llega hasta casi 10 metros. Se observan valores moderados de resistividad, que varían entre 50 y 200 Ohm x m.
- **Fosfoyesos:** La unidad de fosfoyesos presenta un espesor relativamente homogéneo que varía entre 2 y 4 metros, si bien en algún sector alcanza los 6 metros. Los valores de resistividad observados son bajos, comprendidos entre 10 y 20 Ohm x m.
- **Marismas:** Por debajo de los fosfoyesos se encuentra la unidad más conductora, las Marismas. Presenta una morfología y unos espesores muy variables, comprendidos entre 15 y 25 metros, en la mitad NW del perfil, y entre 5 y 15 metros, en la mitad SE. Los valores de resistividad que caracterizan esta unidad son muy bajos (1-10 Ohm x m).
- **Unidad Conglomerática Basal:** Por debajo de la unidad de Marismas se encuentra la unidad conglomerática basal, formada principalmente por arenas y gravas. Se observa una morfología y unos espesores muy variables, comprendidos entre 10 y 40 metros. Los valores de resistividad

observados en esta unidad son moderados-altos, comprendidos de forma generalizada entre 50 y 300 Ohm x m, dependiendo de su mayor o menor contenido en arcilla, respectivamente, o dependiendo de su menor o mayor tamaño de los bolos, también respectivamente. Los valores de resistividad indican, en principio, que pueden tener un contenido en agua de calidad normal, ni salinizada ni contaminada. En el extremo SE del perfil la resistividad llega a 1.000 Ohm x m.

- **Margas:** En la parte baja del perfil se observa la unidad de margas. Presenta una morfología muy irregular debido al contacto erosivo basal de la unidad de conglomerados. Los valores observados en esta unidad son bajos, menores de 100 Ohm x m.

4.3.- PERFIL 3

Características del emplazamiento: Orientación aproximada NW-SE, con inicio del perfil en el NW.

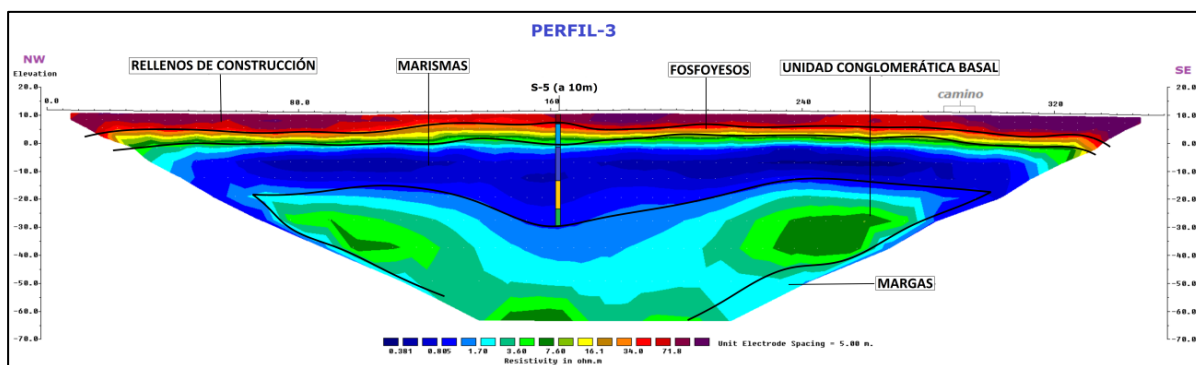


Figura 5. Perfil 3.

Características del subsuelo: Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en cinco unidades principales en función de sus valores de resistividad. La disposición de estas unidades en el subsuelo, desde la parte alta hasta la parte baja, es la siguiente:

- **Rellenos de construcción:** Se observa en la parte superior de todo el perfil, con un espesor medio relativamente poco variable pues suele oscilar entre 4 y 5 metros. Se observan valores medios de resistividad que varían entre 50 y 200 Ohm x m.
- **Fosfoyesos:** La unidad de fosfoyesos presenta un espesor que varía entre 2 y 4 metros, si bien en el sector central alcanza 6 metros. Los valores de resistividad observados son bajos, comprendidos entre 10 y 20 Ohm x m.
- **Marismas:** Por debajo se encuentra la unidad más conductora que se ha interpretado como marismas. Presenta unos espesores variables entre 10 y 20 metros, alcanzando los 30 metros en la parte central del perfil. Los valores de resistividad que caracterizan esta unidad son muy bajos, comprendidos entre 1 y 5 Ohm x m.
- **Unidad Conglomerática Basal:** Por debajo de la unidad de marismas se encuentra la unidad conglomerática basal, formada principalmente por arenas y gravas. Se observa una morfología y unos espesores muy variables, comprendidos entre 10 y 40 metros. Los valores de resistividad observados en este perfil son más bajos que en los perfiles 1 y 2, lo que puede ser debido a una mayor proporción de arcillas.

- **Margas:** En la parte baja del perfil se observa de forma parcial la unidad de margas. Los valores de resistividad observados en esta unidad son bajos, inferiores a 100 Ohm x m.

4.4.- PERFIL 4

Características del emplazamiento: Orientación aproximada W-E, con inicio del perfil en el Oeste.

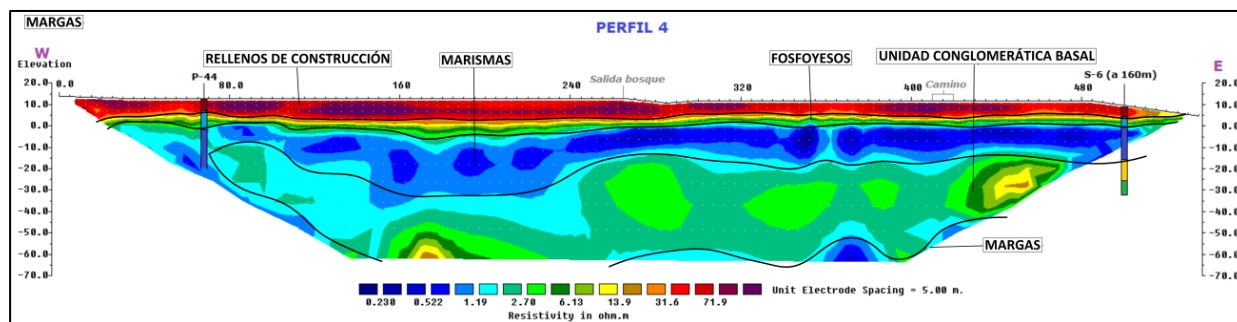


Figura 7. Perfil 4.

Características del subsuelo: Los materiales analizados en este perfil se encuentran agrupados en cinco unidades principales en función de sus valores de resistividad. La disposición de estas unidades en el subsuelo, desde la parte alta hasta la parte baja, es la siguiente:

- **Relleos de construcción:** Aflora a lo largo de todo el perfil y presenta un espesor que varía entre 5 y 10 metros. Se observan valores moderados-altos de resistividad, que varían entre 50 y 200 Ohm x m.
- **Fosfoyesos:** Esta unidad presenta un espesor que varía entre 2 y 5 metros, si bien en algunos sectores alcanza puntualmente 8 metros. Los valores de resistividad observados son bajos, comprendidos entre 10 y 20 Ohm x m.
- **Marismas:** Por debajo de los fosfoyesos se encuentra la unidad más conductora, las marismas. Presenta espesores generalizados cercanos a los 15 metros, alcanzando los 25 metros de espesor en el primer tercio del perfil. Los valores de resistividad que caracterizan esta unidad son muy bajos, comprendidos entre 1 y 5 Ohm x m.
- **Unidad Conglomerática Basal:** Por debajo se encuentra la unidad conglomerática basal, formada principalmente por arenas y gravas. Se observa una morfología y unos espesores muy variables, comprendidos entre 10 y 40 metros. Los valores de resistividad observados en este perfil son más bajos que en los perfiles 1 y 2, esto puede ser debido a una mayor proporción de arcillas.
- **Margas:** En la parte baja del perfil se observa de manera parcial la unidad de margas. Los valores observados en esta unidad son bajos, inferiores a 100 Ohm x m.

5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos e interpretados, se presentan a continuación las principales conclusiones:

- El método geofísico empleado ha permitido conocer las características del terreno de manera rápida y no destructiva. Los datos medidos son de buena calidad ya que se ha controlado con el equipo el porcentaje de error, que ha sido nulo.
- Los materiales muestran en todos los perfiles valores bajos de resistividad eléctrica lo que indica que se trata de una zona saturada en fluidos muy conductores. La cercanía al mar y los fosfoyesos condicionan los bajos valores de resistividad identificados en los perfiles.
- Se observan en el conjunto de la zona estudiada cinco unidades que, de arriba abajo, son las siguientes:
 - **Rellenos de construcción:** Dependiendo de la zona analizada se observa que su espesor es relativamente irregular, casi siempre variable entre 2 m y algo menos de 10 m. En algunos perfiles se llega a apreciar algunos sectores en los que los valores más elevados de resistividad corresponden a una menor compactación de esta unidad. Los valores moderados-altos de resistividad observados varían entre 50 y 200 Ohm x m.
 - **Fosfoyesos:** Esta unidad presenta espesores que varían entre 2 y 8 metros a lo largo de toda la zona de estudio. Esta unidad se caracteriza por tener unos valores de resistividad bajos, comprendidos entre 10 y 20 Ohm x m. Esta unidad presenta la base más baja en la zona sur y más alta en la zona norte.
 - **Marismas:** Por debajo de los fosfoyesos se encuentra la unidad de marismas, caracterizada por espesores variables entre 5 y 30 metros. En esta unidad se observan los menores valores de resistividad, situándose en un rango entre 1 y 10 Ohm x m. El espesor de esta unidad se muestra más potente en los sectores Norte, NE y Este mientras que es menos potente en los sectores NW y Sur de la zona de estudio.
 - **Unidad Conglomerática Basal:** Por debajo de las marismas se encuentra la unidad conglomerática basal, formada por arenas y gravas. Se observan importantes variaciones de espesor a lo largo de toda la zona de estudio, entre 10 y 40 metros. De forma generalizada se observan valores de resistividad comprendidos entre 50 y 300 Ohm x m, aunque llegan a alcanzar 1.000 Ohm x m en algún sector, debido probablemente, a la variación de contenido arcilloso. El techo de esta unidad se muestra más alto en la parte Norte, NE y Este mientras que se encuentra más bajo en los sectores NW y Sur de la zona de estudio.
 - **Margas:** En la parte baja de los perfiles se observa la unidad de margas. Esta unidad presenta valores de resistividad bajos, inferiores a 100 Ohm x m.




Fdo./ Enrique Aracil Ávila
 Doctor en Ciencias Geológicas
 Colegiado nº 4722
 Director de AGS

ANÁLISIS Y GESTIÓN DEL SUBSUELO, S.L.
 Abril de 2021

ANEXOS

ANEXO I

Mapa de situación



Cliente:

eptisa

Proyecto:

CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN LAS MARISMAS DE MENDAÑA (HUELVA).

Ejecución:

AGS
análisis y gestión del subsuelo

MAPA DE SITUACIÓN

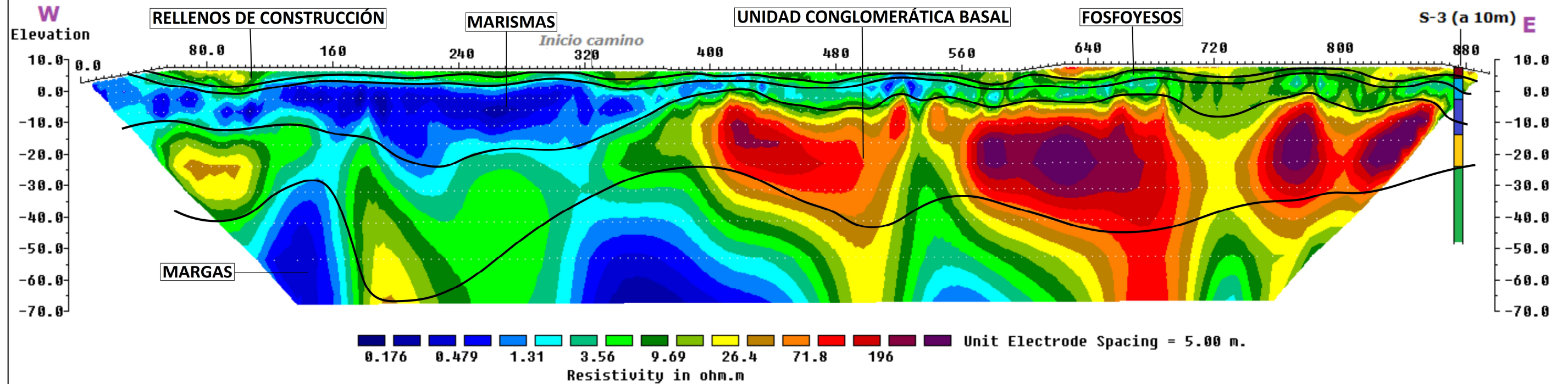
Abril 2021

ANEXO II

Perfiles de tomografía eléctrica



PERFIL-1



Cliente:

ep^tisa

Proyecto:

CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN LAS MARISMAS DE MENDAÑA (HUELVA).

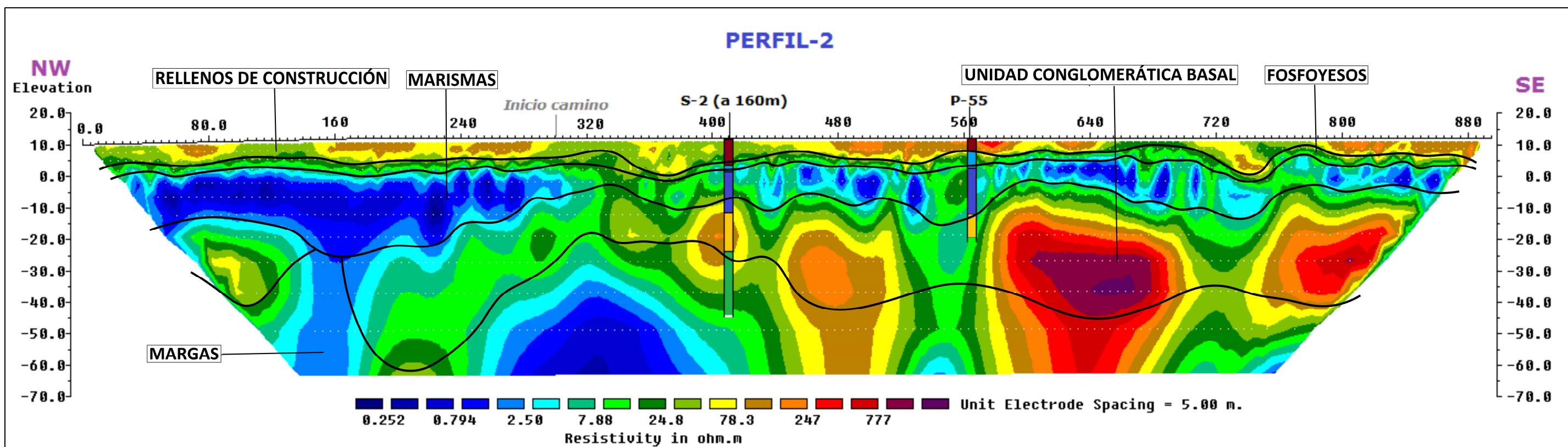
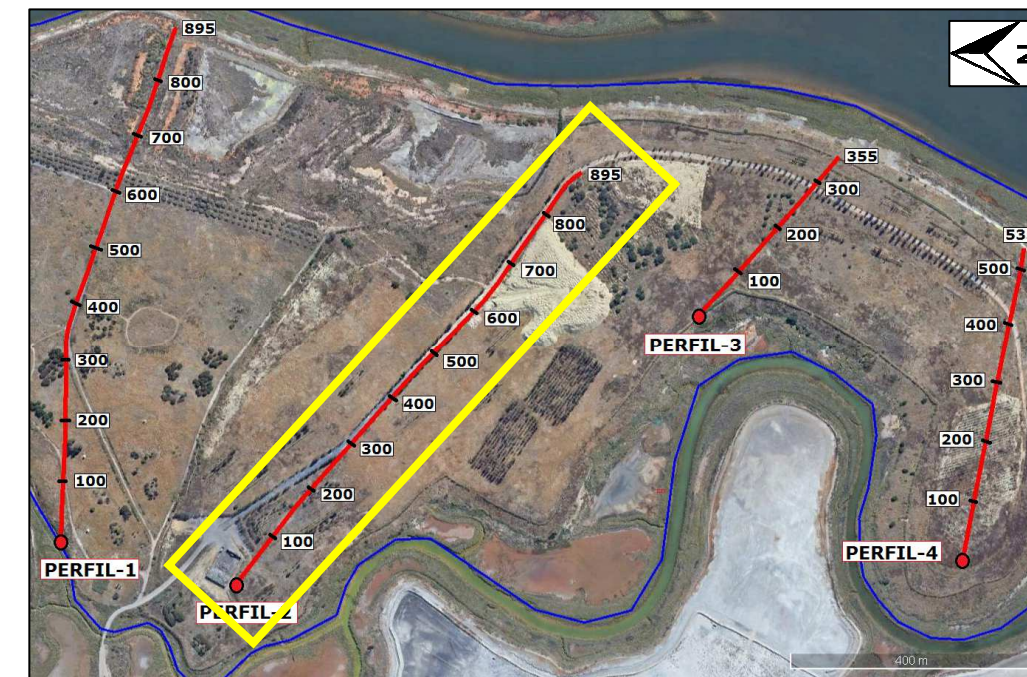
Ejecución:

AGS

análisis y gestión del subsuelo

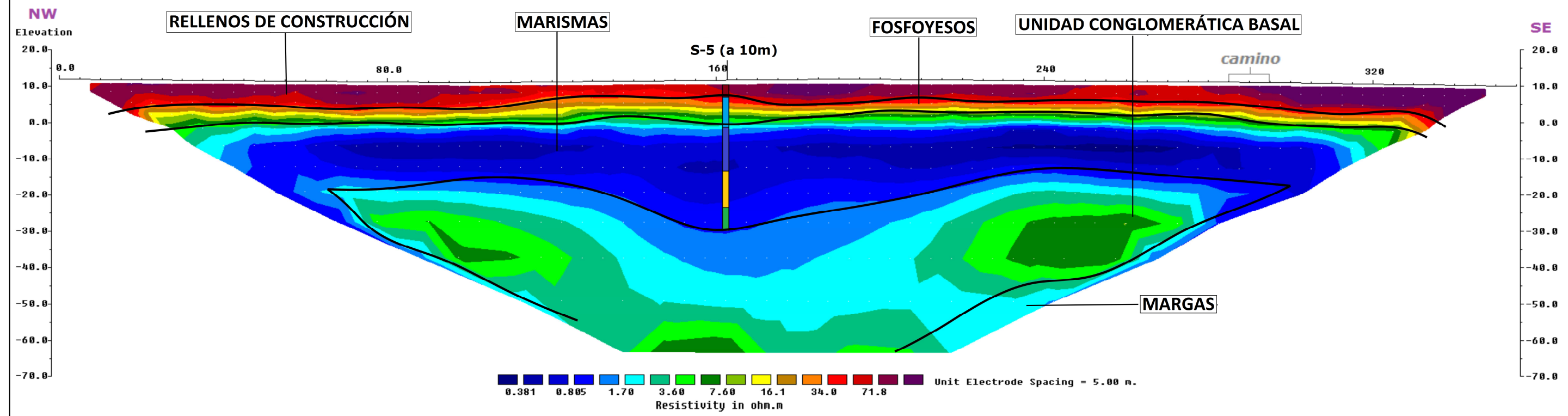
PERFILES TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

Abril 2021





PERFIL-3



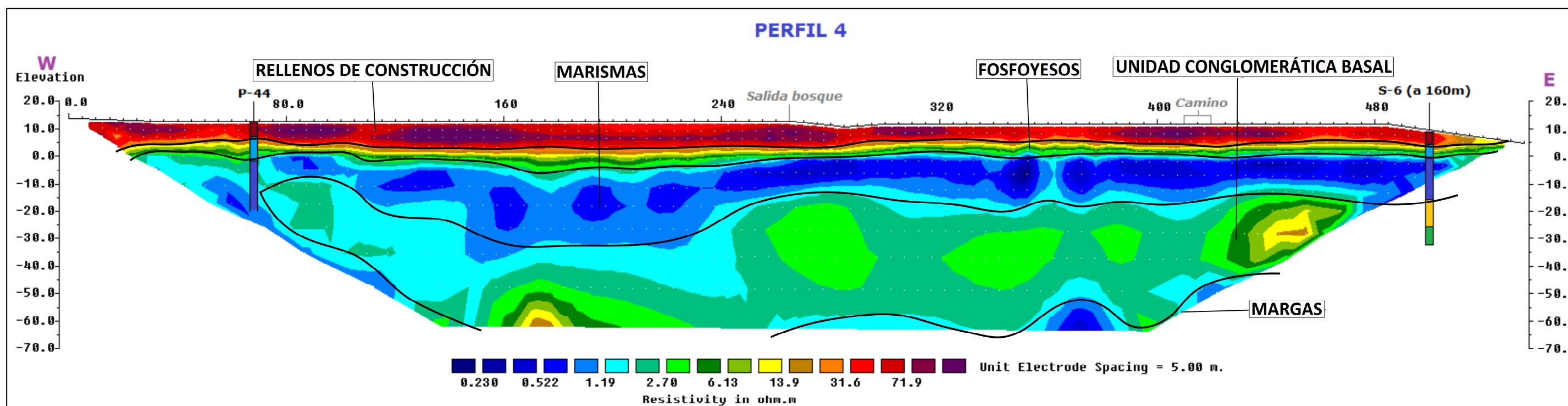
Cliente:
ep_tisa

Proyecto:
CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN LAS MARISMAS DE MENDAÑA (HUELVA).

Ejecución:
AGS
análisis y gestión del subsuelo

PERFILES TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

Abril 2021



Cliente:
ep^tisa

Proyecto:
CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN LAS MARISMAS DE MENDAÑA (HUELVA).

Ejecución:
AGS
análisis y gestión del subsuelo

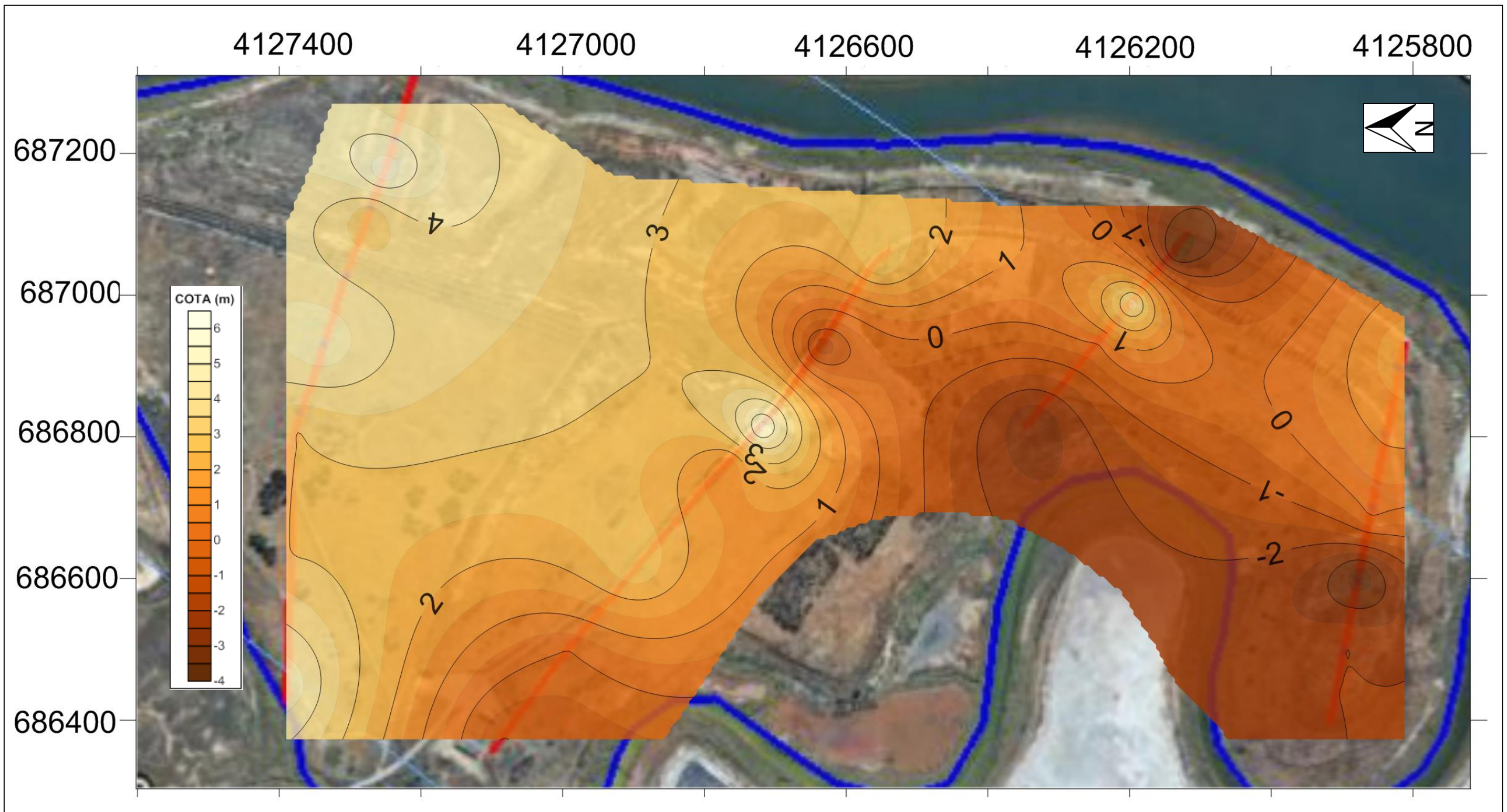
PERFILES TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

Abril 2021

ANEXO III

Resultados

MAPA DE ISOBATAS DE LA BASE DE LOS FOSFOYESOS



Cliente:

eptisa

Proyecto:

CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN LAS MARISMAS DE MENDAÑA (HUELVA).

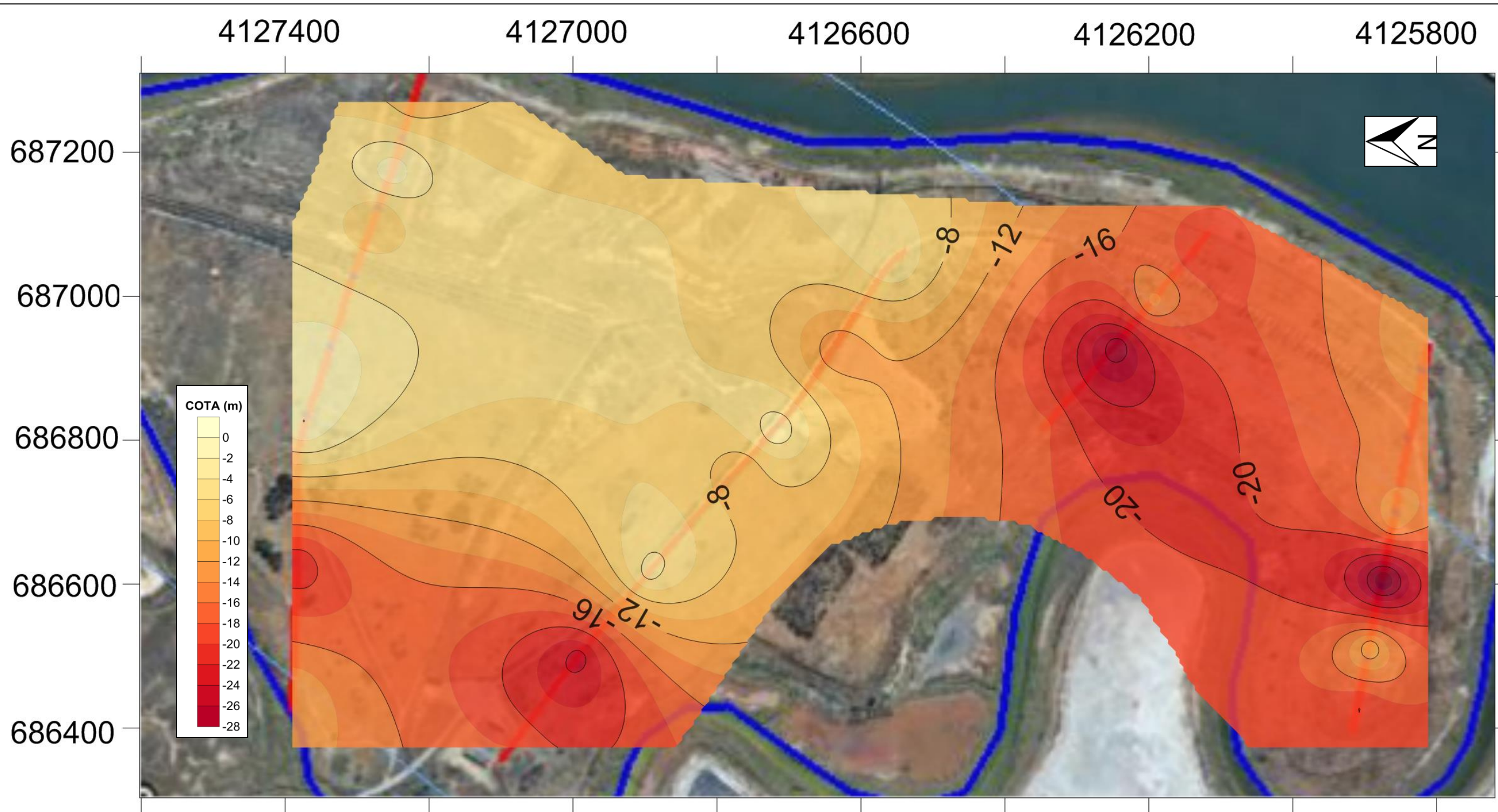
Ejecución:

AGS
análisis y gestión del subsuelo

RESULTADOS

Abril 2021

MAPA DE ISOBATAS DEL TECHO DE LA UNIDAD CONGLOMERÁTICA BASAL (UCB)



Cliente:
eptisa

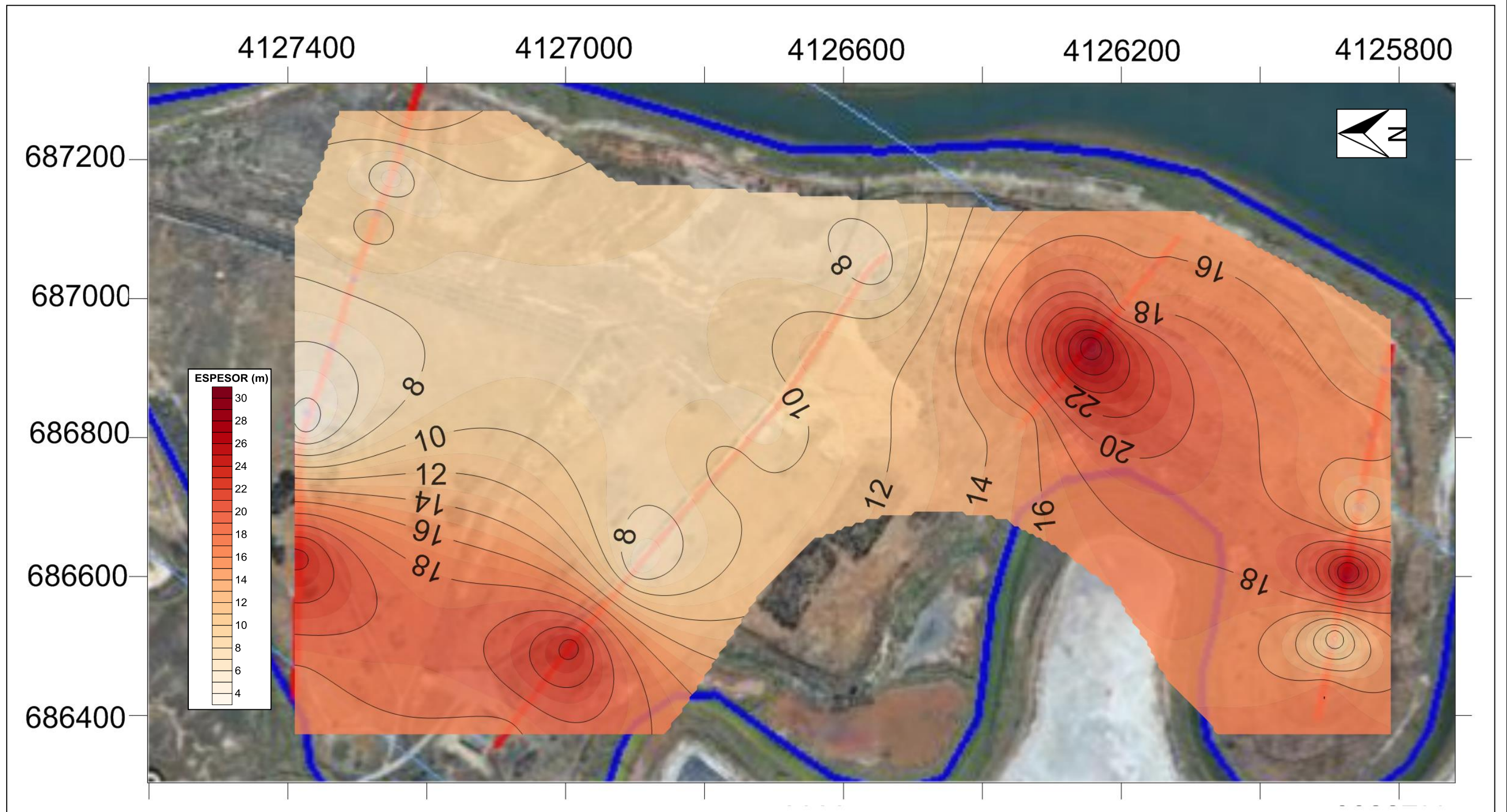
Proyecto:
CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN LAS MARISMAS DE MENDAÑA (HUELVA).

Ejecución:
AGS
análisis y gestión del subsuelo

RESULTADOS

Abril 2021

MAPA DE ISOPACAS UNIDAD DE MARISMAS



Cliente:

eptisa

Proyecto:

CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN LAS MARISMAS DE MENDAÑA (HUELVA).

Ejecución:

AGS
análisis y gestión del subsuelo

RESULTADOS

Abril 2021

ANEXO IV

Fotografías

PERFIL - 1



PERFIL - 2



PERFIL - 3



PERFIL - 4

