

# IMPACTO HUMANO Y ALTERACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS CULTIVADOS EN LA TERRAZA BAJA DEL EBRO EN NAVARRA

EUGENIO DE EZQUERRA COBERTERA ([id](#))<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Cátedra de Bardenas Reales de Navarra de Ciencia y Patrimonio, Universidad Pública de Navarra*

Autor de correspondencia: [eecobertera@yahoo.es](mailto:eecobertera@yahoo.es)

**Resumen.** En la parte sur del Campo de Mosquera de Tudela se han investigado los suelos cultivados de la terraza baja del Ebro, en el periodo 2016 a 2022. Se ha creado un GIS con pixels de 5\*5 m, con las capas siguientes: coordenadas UTM; datos catastrales; topografía de los terrenos de cultivo; topografía del nivel freático; profundidad del nivel freático respecto de la superficie de las parcelas cultivadas; valores batimétricos del Ebro; rendimiento de maíz grano por hectárea; conductividad de los suelos; conductividad del agua del Ebro; regresión cúbica entre la profundidad de la capa freática y el rendimiento del maíz; y cálculo del rendimiento del maíz aumentando la profundidad de la capa freática 30 y 40 cm. La producción de maíz, en el 45 % de las 127 hectáreas de estudio, tiene una merma de cosecha estimada en 225.552 kg, equivalente a 67.665 € a precios de enero de 2022. La causa de este bajo rendimiento de cosecha se relaciona con el nivel freático, situado a menos de 2 metros de profundidad respecto al suelo de cultivo. Se comprueba que el alto nivel de la capa freática, en los suelos de cultivo, está relacionado con el nivel constante de la lámina de agua del Ebro. Se trata de agua represada, con tableros provisionales ubicados por encima de la cota de la presa. Para paliar los daños en el cultivo, se estima importante que el nivel freático descienda entre 30 y 40 cm, eliminando los tableros de la presa, rebajando así el nivel de la lámina de agua unos 0,40 metros, incluyendo los tableros de 0,87 m. Teniendo en cuenta el necesario aumento de la profundidad del nivel freático, una actuación a evaluar sería la del recrecimiento del nivel del suelo cultivado en las fincas más afectadas, sobre todo si no se retiran los tableros de la presa.

**Palabras clave:** rendimiento maíz, profundidad de la capa freática, conductividad río Ebro.

## HUMAN IMPACT AND CHANGE IN THE FERTILITY OF CULTIVATED SOILS IN THE LOW TERRACE OF THE EBRO IN NAVARRE

**Abstract.** In the southern part of the Campo de Mosquera de Tudela, this investigation has been carried out, of the soils cultivated on the lower terrace of the Ebro, in the period 2016 to 2022. A GIS with 5\*5 m pixels has been created with the following layers: UTM coordinates; cadastral data; cropland topography; water table topography; depth of the water table with respect to the surface of the cultivated plots; grain corn yield per hectare; soil conductivity; conductivity of the Ebro water, cubic regression between the depth of the water table and the yield of corn; simulation of corn yield by increasing the depth of the water table, 30 and 40 cm, and bathymetric values of the Ebro in the studied area. Corn production, in 45% of the 127 hectares studied, has an estimated crop loss of 225,552 kg, equivalent to 67,665 € at January 2022 prices. The cause of this low crop yield is related to the level water table, located less than 2 meters deep with respect to the cultivated soil. And, it is found that the high level of the water table in cultivated soils is related to the constant level of the Ebro water sheet; dammed water, with provisional boards, above the level of the dam. To alleviate the damage to the crop, it is estimated that the water table should drop between 30 and 40 cm, eliminating the 0.32 m boards of the dam and lowering the level of the water sheet to 0.40 meters in the boards of 0.87 m. Considering the necessary increase in the depth of the water table, an action to be evaluated would be the regrowth of the cultivated soil level in the most affected farms, especially if the planks of the dam are not removed.

**Key words:** corn yield, water table depth, Ebro River conductivity.

## 1. INTRODUCCIÓN

En diciembre de 1949, el Ingeniero Agrónomo del Instituto Nacional de Colonización, D. Federico Collado Berceo, realizó el Proyecto de Saneamiento del Campo de Mosquera en Tudela (Navarra), con el objeto de sanear una zona de unas 370 ha que se encontraba inutilizada para el cultivo. La causa principal del problema, según se explica en el Proyecto, fue el recrecimiento, con obra de fábrica, de la presa de Pignatelli del Canal Imperial de Aragón, con el consecuente aumento del nivel del Ebro aguas arriba de la presa. Esta situación fue paliada ejecutando el Proyecto, aumentando así la fertilidad edáfica en casi la totalidad de la superficie afectada.

Sin embargo, desde los años 80 del siglo pasado, la existencia de un nuevo recrecimiento con tableros “provisionales”, ha producido otro aumento del nivel del Ebro, con nueva reducción de la fertilidad edáfica y, en consecuencia, de los rendimientos de cultivo.

En esta investigación se pretenden establecer las causas y las posibles mejoras, del rendimiento del cultivo de maíz en la terraza baja del Ebro, aguas arriba de la presa de Pignatelli.

## 2. MATERIAL Y MÉTODO

Comenzamos los trabajos de campo el año 2016 hasta el otoño de 2020; en una superficie de 127 hectáreas, ubicadas junto a la ribera derecha del Ebro, aguas arriba de la presa. Se obtuvieron valores del rendimiento de cosecha del maíz de los años 2016 a 2020. Se realizaron calicatas para establecer el nivel freático y analíticas de la conductividad de los suelos. Se creó un GIS a partir del estudio topográfico de las tierras de cultivo, de la batimetría del Ebro y de los datos de rendimiento de cosecha,

Este método permitió obtener los valores, en pixels de 5\*5 m, de las siguientes capas: coordenadas UTM; datos catastrales; topografía de los terrenos de cultivo; topografía del nivel freático; profundidad del nivel freático respecto de la superficie de las parcelas cultivadas y rendimiento de maíz en grano.

Mediante la regresión cúbica, se obtuvo la correlación entre la distancia de la capa freática respecto al suelo de la parcela y el rendimiento de cosecha del maíz; trasladando los resultados al GIS.

### 2.1. Los rendimientos de cosecha del maíz. La influencia de la salinidad del suelo

Además de utilizar los rendimientos anuales reales, por parcela, se tomaron los datos de peso y humedad del maíz en grano, en puntos concretos referenciados. Se dividieron las parcelas en función de las características del suelo y del propio desarrollo de la vegetación; concordando, muchas veces, los resultados con las subparcelas catastrales, ya que el catastro tiene una finalidad fiscal relacionada con la productividad.

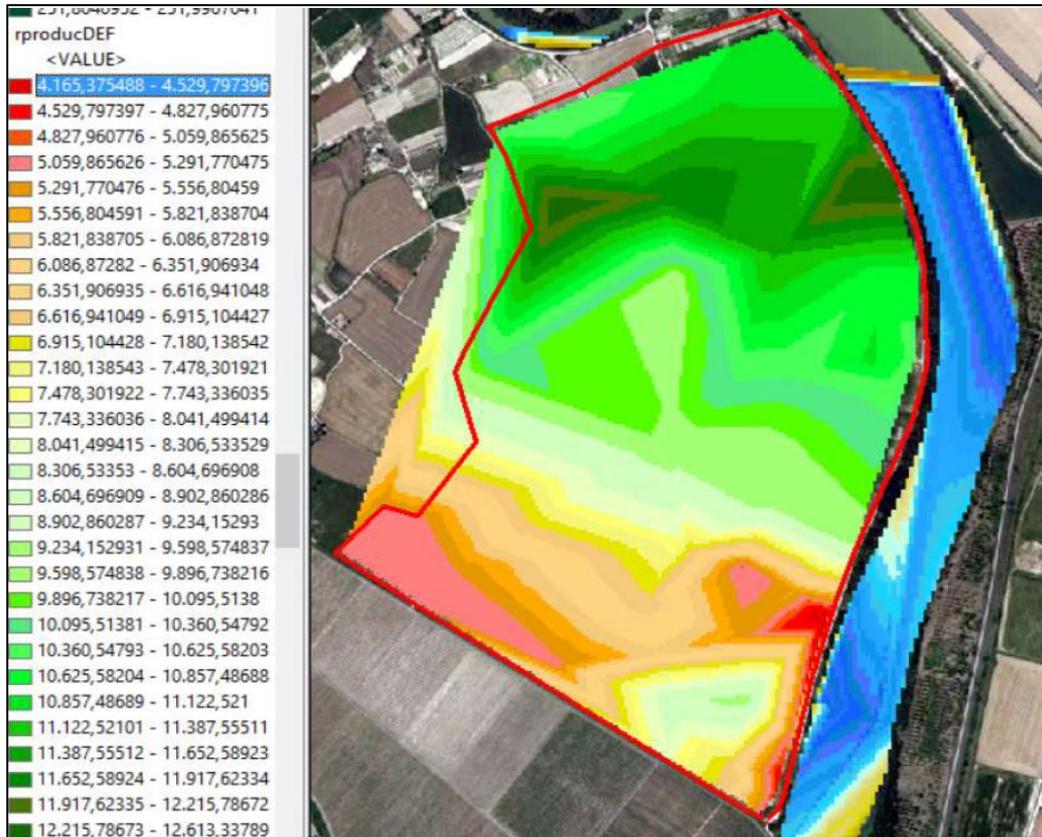
Se separaron los resultados por variedades de maíz, observando que, a efectos de este trabajo, dieron rendimientos muy similares en parcelas o subparcelas semejantes, distinguiéndose un rendimiento algo menor en las variedades convencionales, con respecto a las transgénicas. Para establecer los rendimientos en los rodales con plantas poco desarrolladas, se tomaron muestras in situ, georeferenciadas por cada pixel de 5\*5 m.

Se tomaron muestras de suelo georeferenciadas, a tres profundidades: 0 a 17,5 cm; 17,5 a 35 cm y 35 a 52,5 cm, con resultados analíticos de la conductividad eléctrica de la solución del suelo y de la pasta saturada. Los análisis fueron realizados en el laboratorio de la Escuela de Ingenieros Agrónomos de la UPNA, con la supervisión del Profesor Virto.

Se consideraba que la elevada conductividad podía ser la causante de las bajas cosechas de maíz y la analítica y el trabajo de campo, iniciado en 2016, tenían por objeto comprobar la posible correlación inversa, entre los rendimientos de maíz y los valores de la conductividad del suelo. Pero se comprobó que no podía establecerse una correlación. En efecto, con similares concentraciones salinas, los rendimientos fueron muy variables. No obstante, en estos puntos de muestreo, se continuó valorando el rendimiento de cosecha, para disponer de mayor número de referencias, realizando la valoración de los mismos parámetros topográficos y freáticos que en el resto de los puntos estudiados, en total 238, con los respectivos valores de producción y rendimiento por hectárea, promediando los resultados de los años 2016 y 2020.

La superficie total evaluada es de 127 hectáreas, con una producción media, en el periodo de cuatro años, de 1.146 toneladas de maíz grano y rendimientos entre 12.820 kg y 4.070 kg por hectárea. La distribución espacial de la producción, incorporada al GIS, se puede ver en el mapa de la Figura 1 siguiente.

Figura 1 Mapa de Rendimientos actuales en kg de maíz grano por ha.  
Batimetría del Ebro en el cauce fluvial (azul)



Fuente: Elaboración propia

## 2.2. La batimetría del Ebro en el área de estudio.

La batimetría se ha obtenido con seis perfiles transversales, correspondientes a 1.056 puntos UTM con las cotas de fondo, a partir de los cuales se interpoló con ArcGIS, calculando la profundidad del tramo del río limítrofe con nuestro espacio de estudio. Los datos fueron cedidos por el Servicio de Economía Circular y Agua, de la Dirección General de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno de Navarra: *Realización de perfiles batimétricos en el río Ebro en Navarra (2017)*.

Puede verse, en la Figura 1 anterior, el azul más intenso del cauce del río que corresponde con la máxima profundidad del Ebro -unos 3 metros-, al sur de su ribera derecha. Se observa que, en las parcelas de cultivo limítrofes con el dique del río, el rendimiento de maíz es muy bajo y se ha cartografiado en color rojo.

Existe una relación entre la mayor profundidad del Ebro y el nivel freático en las parcelas próximas a la orilla, en ese punto, cuantificada entre 5 y 15 cm por encima de la cota freática media.

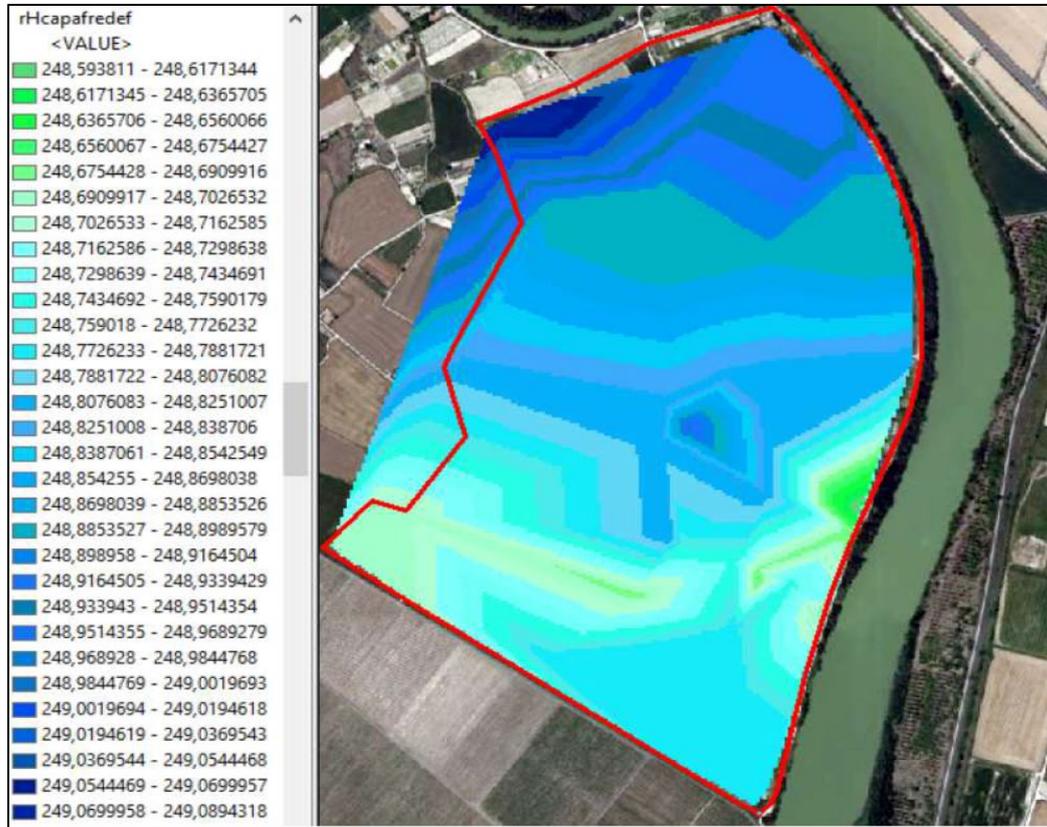
## 2.3. El levantamiento topográfico. Relieve y capa freática

Se realizó un levantamiento topográfico del espacio estudiado, con curvas de nivel equidistantes 0,5 centímetros, necesario por tratarse de un relieve horizontal, en el que las pequeñas diferencias son importantes con respecto a la profundidad del nivel freático. Los valores topográficos se aplicaron al GIS, resultando el mapa de relieve, de la Figura 2, siguiente, con pixels de 5\*5 metros, dimensión utilizada para todos los parámetros calculados.

Para establecer los niveles de la capa freática, se realizaron 48 calicatas, en los veranos de 2018 y 2019, con retroexcavadora a una profundidad máxima de 2,80 m. Se estudiaron los materiales del perfil y,

diez días después, tomando la cota (s.n.m.) del nivel freático, se incorporaron estos valores a la respectiva capa del GIS. Conocidas las cotas del terreno y del nivel freático, se introdujo en el GIS la diferencia entre ambas, resultando una cartografía con la distancia entre el freático y la superficie del suelo cultivado, en pixeles de 5\*5 m, como puede verse en el mapa de la Figura 4, más adelante.

Figura 2. Mapa de las cotas del nivel freático en metros (s.n.m)



Fuente: Elaboración propia

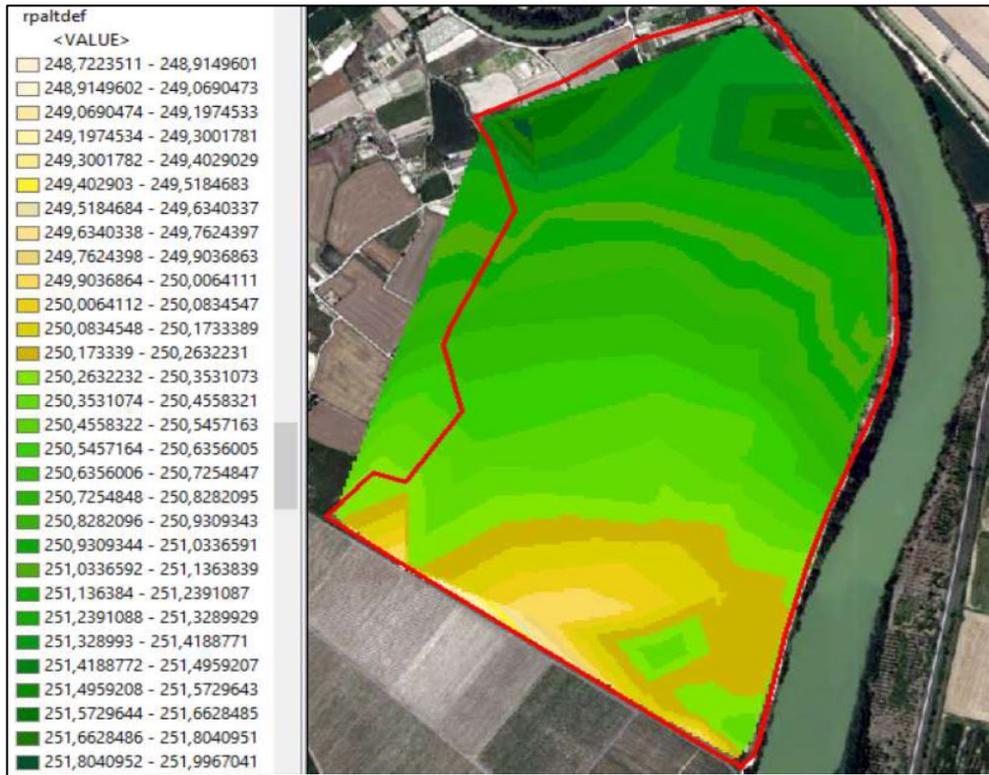
#### 2.4. Rendimientos de cosecha y profundidad del nivel freático. Cálculo de la regresión cúbica.

La Figura 2 corresponde al mapa de las cotas s.n.m. del nivel freático. A continuación, en la página siguiente, se muestra la Figura 3, con el mapa de las cotas s.n.m de las tierras de cultivo. A partir de estos datos se ha calculado la distancia, en metros, entre las cotas de las tierras de cultivo y las cotas del nivel freático, es decir su "profundidad", como se aprecia en el mapa del GIS correspondiente a la Figura 4.

A partir de los datos georeferenciados de los rendimientos de maíz grano por hectárea, (Figura 1), y de la distancia entre la superficie del suelo y la capa freática, se establecieron los valores de rendimiento de maíz, en grano por hectárea, en los 254 puntos del GIS.

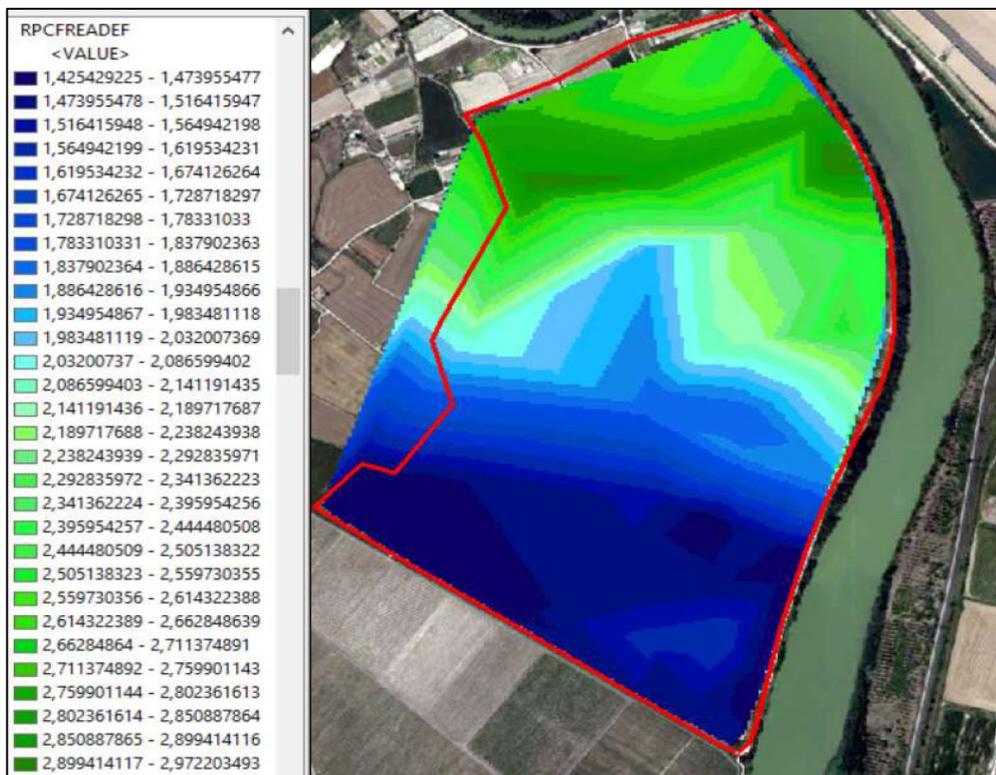
Para el cálculo de los rendimientos de cosecha se ha partido de los datos, por pixeles de 5\*5 m, de la distancia en metros entre el nivel del suelo cultivado y el de la capa freática. Utilizando, finalmente, el análisis de la ecuación cúbica, a partir de esos datos, se obtuvo una relación estadísticamente significativa entre las variables, indicando que, el ajuste proporcionado da mejores resultados que el obtenible con regresión cuadrática.

Figura 3. Mapa de las cotas de las tierras de cultivo en metros (s.n.m)



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Mapa de distancia en metros entre las cotas (s.n.m.) del terreno cultivado y las del freático



Fuente: Elaboración propia

La expresión cúbica resulta útil en este caso, para hacer estimaciones y predicciones de la variable dependiente, es decir de los rendimientos de cosecha (Y), a partir de los valores de la variable (X) correspondientes a la distancia vertical, en metros, entre la superficie de los campos de cultivo (s.n.m.) y la del nivel freático, también en metros s.n.m

La ecuación cúbica de cálculo es:

$$Y = 11525,2824 \cdot X^3 - 78953,1001 \cdot X^2 + 178465,2459 \cdot X - 122621,6685$$

Siendo:

Y: kg por hectárea de maíz en grano; X: distancia en metros desde el nivel del campo de cultivo hasta el del freático; el coeficiente de correlación es de 0,9666; el coeficiente de determinación es 0,9344; el error típico promedio es 0,95.

Se trata de una relación causa efecto, es decir nivel freático y rendimiento de cultivo que, ya en principio, tiene una justificación teórico-práctica, puesto que las raíces profundas del maíz, al entrar en contacto con la capa freática, limitan su desarrollo y oxigenación. Una cierta salinidad del agua no se considera causa fitotóxica directa importante, ya que se trata de una conductividad inferior a 1,7 dS/m.

En el cuadro siguiente de la Figura 5 se aprecian algunos resultados. Se constata un umbral del rendimiento de cosecha aceptable, en torno a un freático a >2 m por debajo del nivel del terreno de cultivo; es decir, malos rendimientos con X inferior a 2 m. Causa y efecto que se sustentan en base al buen juicio, al conocer las cotas de los niveles freáticos en los campos de cultivo y los rendimientos reales de maíz correspondientes.

Figura 5. Muestra de resultados con la regresión cúbica

regresión cúbica	x	CALCULADO	REAL
PUNTOS	Z-zf	y	kg/ha
6	2,974000	12.981	12.638
4	2,931800	12.404	12.512
5	2,900200	12.024	11.902
9	2,819000	11.239	11.437
3	2,814700	11.204	11.314
1	2,770070	10.886	10.974
13	2,537800	10.171	10.920
25	2,303928	10.407	10.889
10	2,414100	10.232	10.757
18	2,410000	10.237	10.572
12	2,405800	10.243	10.534
16	2,296800	10.420	10.531
17	2,174030	10.629	10.420
2	2,784380	10.980	10.409
21	1,966000	10.654	9.852
26	1,967740	10.657	9.852
27	1,966543	10.655	9.852
23	1,958072	10.641	9.767
8	1,958050	10.640	9.760
19	1,792000	9.972	9.686
20	1,691000	9.127	9.530
42	1,619562	8.282	9.520
22	1,682000	9.033	9.528
29	1,548500	7.208	9.000
30	1,532900	6.939	8.100
43	1,532320	6.929	7.965
28	1,529725	6.883	7.613
44	1,528000	6.852	7.165
36	1,520709	6.720	7.049
39	1,519182	6.692	7.028
45	1,509180	6.505	6.882
47	1,497400	6.279	6.728
41	1,483171	5.995	6.228
49	1,481400	5.959	5.164
40	1,465732	5.632	5.102
38	1,456217	5.427	5.098
31	1,461300	5.537	5.030
32	1,456400	5.431	5.030
33	1,456140	5.426	5.030
34	1,458220	5.471	5.030
46	1,454540	5.390	4.636
48	1,453260	5.362	4.636
35	1,407100	4.284	3.240
<b>Totales</b>		<b>364.644</b>	<b>364.903</b>

Leyenda: Comparación del rendimiento calculado (Y) con regresión cúbica y el rendimiento de cosecha real, mediante el valor (X), resultante de la diferencia de altitud entre el nivel del terreno (z) y el nivel freático (zf). Fuente: Fuente: Elaboración propia

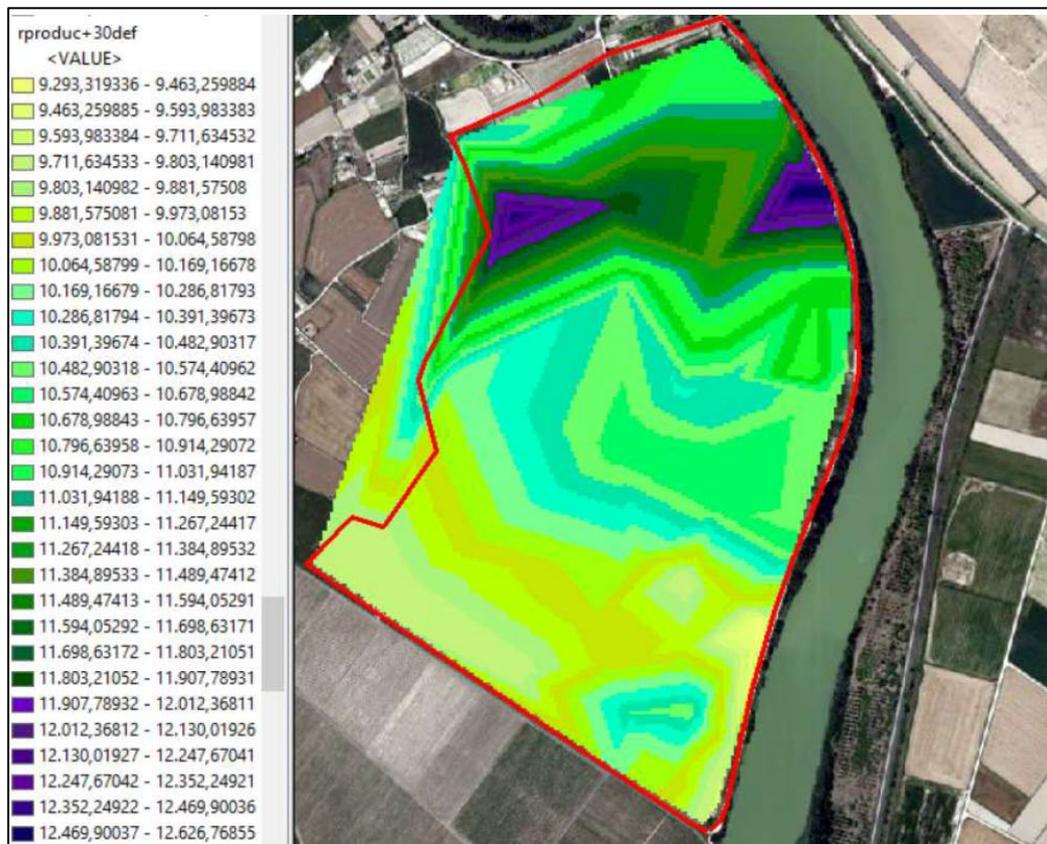
### 3. RESULTADOS

Se ha confirmado que la profundidad del nivel freático desde el nivel del suelo cultivado, tiene un valor umbral de 2,04 m y que, por debajo de dicho valor, el rendimiento de cosecha de maíz desciende correlativamente.

El proceso de cálculo nos indica la importancia de trasladar esta regresión para hacer estimaciones predictivas, en concreto estableciendo la mejora de los posibles rendimientos del maíz, si el nivel del freático descendiera entre 30 y 40 centímetros. Hay que tener en cuenta que el nivel del agua en la presa de Pignatelli era, a mediados del siglo pasado, concordante con rendimientos normales, según datos de las cosechas anteriores a la presencia de tableros de recrecimiento provisional. Es decir, que se pueden calcular los rendimientos de cosecha estimados, en caso de una hipotética retirada de los tableros de la presa, aplicando distintos niveles del Ebro embalsado.

En las Figuras 6 y 7 siguientes, se muestran las capas del GIS con dos rendimientos de maíz calculados con la regresión cúbica y que se corresponden con niveles del freático de 30 y 40 cm por debajo del nivel actual. Cálculos cuyos resultados cuantifican la posible rentabilidad normalizada en todo el espacio estudiado, incluyendo la mitad sur afectada,

Figura 6. Mapa de rendimiento del maíz en kg por ha, con 30 cm de descenso del nivel freático



Fuente: Elaboración propia

### 4. DISCUSIÓN

En nuestra opinión, para solucionar los problemas de disminución de la fertilidad de los suelos estudiados, no sería adecuada la intervención drenando las parcelas, como se ha realizado en otras fincas del Campo de Mosquera. El nivel freático de los suelos se corresponde con la cota de la lámina de agua del Ebro, por lo tanto, el bajo rendimiento de cosecha sólo podría mejorarse con una profundidad del nivel freático de 2 a 2,5 metros, y no con otras actuaciones.

En 2016 se comprobó que no existía una correlación inversa, entre los rendimientos de maíz y los valores de la conductividad del suelo, en las 127 hectáreas estudiadas. Tan solo en algunos rodales con

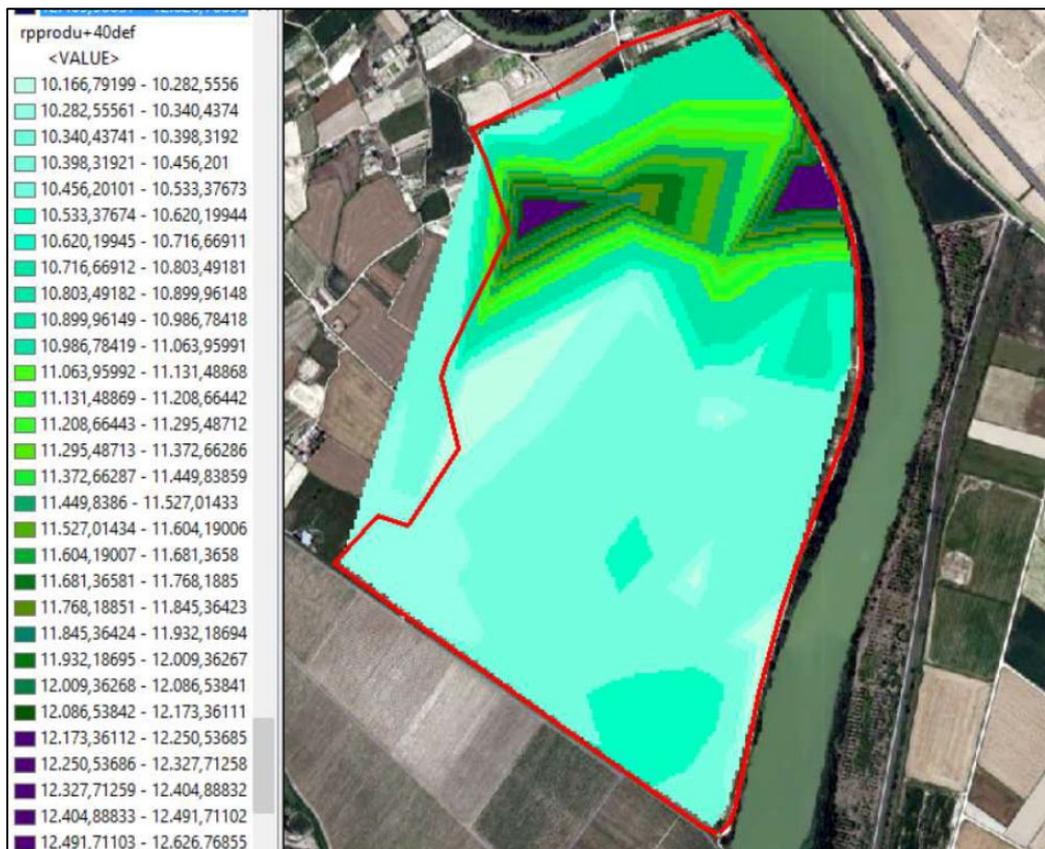
entrada de las aguas para el riego a manta, se produce una concentración salina por evaporación, con fitotoxicidad importante en el maíz.

Se ha comprobado que no existe, en el territorio de estudio, salinidad procedente de estratos geológicos terciarios ni, tampoco, de las terrazas cuaternarias ubicadas al oeste, que expliquen las bajas producciones en el cultivo del maíz. Los suelos estudiados no son salinos, aunque exista una procedencia salina, muy baja, directamente de las propias aguas del Ebro, -con conductividad de 1,569 dS/m, según analítica de agosto de 2017-. Del Ebro se filtra a las parcelas a través del dique de tierra y, por otro lado, procede del agua de riego de la acequia de Mosquera, aportada por el Ebro en la presa de la Obra, aguas arriba.

No parece discutible, ateniendo a nuestro trabajo, que los niveles freáticos, situados a menos de 2 metros de profundidad respecto a la superficie del terreno, sean la causa de los bajos rendimientos de cosecha, con un desarrollo vegetal limitado por efecto de un freático con ligera aportación salina; tampoco hay que descartar la asfixia radicular ajena a la conductividad; cuestión que forma parte de la discusión entre la presencia salina y el cultivo de maíz, en esta zona del Ebro, estudiada por Enrique, A. y Virto, I. (2010).

Se ha observado una cierta relación entre la mayor profundidad del Ebro (3 m) y el nivel freático en las parcelas próximas a la orilla sur de la margen derecha del río, cuantificada entre 5 y 15 cm por encima de la cota freática media. Esta característica determina una disminución del rendimiento de cosecha, en el suelo situado junto al dique del Ebro, al sur de su margen derecha, como se aprecia en la Figura 1. Es interesante para el estudio de reservorios a ambos lados del dique con actividad hidráulica efectiva (Romanazzi y Cassiraga (2014), aunque no forma parte de esta investigación.

Figura 7. Mapa de rendimiento del maíz en kg por ha, con 40 cm de descenso del nivel freático



Fuente: Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES

Se ha producido un impacto humano afectando a los suelos de cultivo, por el recrecimiento de la presa de Pignatelli. Se ha cuantificado la alteración producida en el ecosistema agrario y la conservación de la fertilidad del suelo, al establecer las causas de la alteración y su mejora, que se considera necesaria.

La profundidad de la capa freática respecto al nivel del terreno de cultivo oscila entre 1,454 m en la parte Sur y 2,972 m en la parte Norte; los 2,04 metros, como se ha indicado, pueden considerarse como valor umbral mínimo aceptable. Ese umbral divide el territorio estudiado en dos espacios de distinta fertilidad: la mitad norte no tiene problemas en la producción de maíz, mientras que la otra mitad sur tiene rendimientos de cosecha entre el 20 y el 50 % por debajo de lo normal.

En esa parte sur, la producción de maíz tiene una merma de cosecha de 225.552 kg anuales, equivalentes a 67.665 €, a precios de enero de 2022 -en 2023 se ha doblado el precio del maíz grano-. Para facilitar el buen desarrollo del cultivo del maíz y evitar la degradación del suelo, como ya se ha indicado, sería preciso actuar, para aumentar la profundidad del nivel freático, en los suelos del sur del terreno estudiado, retirando los tableros provisionales de la presa en invierno y, sobre todo, en primavera; y/o aumentando, el nivel de las parcelas afectadas con aportación de tierras, reubicando el horizonte antrópico en superficie, hasta conseguir un nivel freático, como mínimo, de 2 metros de profundidad.

La situación es, por lo tanto, grave desde el punto de vista no sólo de la conservación del suelo sino también de la rentabilidad de las explotaciones. Por las mismas causas, en la margen izquierda del Ebro, en Cabanillas, la situación y estado es muy similar.

Se trata, en resumen, de una alteración importante del ecosistema agrario, con un impacto humano de usos diversos compartidos y de posible solución, también humana.

## REFERENCIAS

- Apesteeguía, M., Virto, I., Orcaray, L., Enrique, A., Bescansa, P. (2015). Effect of the Conversion to Irrigation of Semiarid Mediterranean Dryland Agroecosystems on Soil Carbon Dynamics and Soil Aggregation. *Arid land research and management*. 29, 4, 399-414.
- Amezqueta, E. (2016). Problemática relacionada con la Salinidad del Suelo en Navarra. Sección de Evaluación de Recursos Agrarios (SERA) *Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación (DAGA) Gobierno de Navarra*.
- Cobertera de Ezquerro, E. (2015). *Edafología aplicada*. 2ª Edic. Cátedra, Madrid.
- Enrique, A, Virto, I. (2010). Efecto de la salinidad del suelo en la producción de maíz en la ribera del Ebro en Navarra. En *Tecnología de Suelos: estudio de casos. Colección textos docentes. Prensas Universitarias de Zaragoza y Universitat de Lleida* (pg. 187).
- Farquhar, G.D., Von Caemmer, S., Berry, J.A., (2001). Models of photosynthesis. *Plant Physiol*. 125, 42-5.
- Romanazzi, P; Cassiraga, E (2014). Regionalización de los parámetros hidrogeológicos en un acuífero con doble porosidad. EN *II Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas (CIAS 2014)*. (793 - 803). Valencia, Spain: Editorial Universitat Politècnica de València.