

**RELACIÓN DE LA RATIO DEL COEFICIENTE DE CULTIVO Y DE LA
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL ($K_c \cdot E_{To-1}$), CON EL CONTENIDO DE
CARBONO (C) EN SUELOS CULTIVADOS Y FORESTALES, EN CLIMA
MEDITERRÁNEO SEMIÁRIDO**

**Relationship of the ratio of the crop coefficient and the potential evapotranspiration
($K_c \cdot E_{To-1}$), with Carbon (C) content in cultivated and forest soils, in semiarid
mediterranean climate**

EUGENIO COBERTERA DE EZQUERRA¹

Resumen

Se han evaluado los contenidos de C edáfico, en unidades espaciales a gran escala, mediante el siguiente material: topografía de detalle (MDT con pixels de 5x5 m); usos del suelo (Ortofotos 1:5.000, y CORINE y MFE a 1:50.000); mapa de elaboración propia de la E_{To} por pixel de 10x10 m y del coeficiente de cultivo (K_c); y análisis georreferenciados de la materia orgánica (C), del horizonte A_1 o A_p del suelo. Mediante la regresión cuadrática entre la ratio $k_c \cdot E_{To}^{-1}$ y los correspondientes valores analíticos de C en el suelo, se han calculado las $t \cdot ha^{-1}$ de C de cada pixel de 10x10 m, ahorrando trabajo de recogida de muestras y analítica de laboratorio.

El modelo es de aplicación predictiva, en climas semiáridos, ya que permite simular variaciones en los parámetros climáticos y en los usos del suelo. De esta forma se podrían predecir, a escala de detalle, los procesos de deterioro del medio, como, por ejemplo, el aumento de la desertificación, por descenso de la sostenibilidad, cuantificada por la pérdida de materia orgánica (C) en los suelos; o la mejora, cuantificada por el aumento del C fijado. Todo ello a partir de la cuantificación de la correlación clima-suelo-vegetación.

Palabras clave: Bárdenas, cambio climático, materia orgánica, sostenibilidad, vegetación.

¹ Grupo Hidrología y Conservación (UCAV). Grupo Forest, Water & Soil. Contacto: CRUZAT@telefonica.net

Abstract

They have been evaluated soil C content, in large-scale spatial units, by the following material: detail topography (MDT with pixels of 5x5 m); land uses (Orthophotos 1: 5.000, and Corine and MFE to 1: 50.000); map of developing own of the ETo by pixel of 10x10 m and the crop coefficient (Kc); and geo-referenced of organic matter analysis (C), soil Ap or A₁ horizon. Using the quadratic regression between the ratio $Kc \cdot ETo^{-1}$ and the corresponding analytical values of C in the soil, have been calculated t·ha⁻¹ of C of each pixel 10x10 m, thus saving the work of analytical laboratory and specimen collection.

The model is predictive application in semiarid climates, because it allows to simulate variations in climate parameters and land use. Thus they could predict scale detail, deterioration processes medium, for example, increased desertification, by lowering the sustainability quantitated by loss of organic matter (C) in the soil; or amelioration, quantified by increased C fixed. All this from quantifying the correlation of climate and soil-vegetation.

Key words: Bardenas, climate change, organic matter, sustainability, vegetation.

1. Introducción

El contenido en materia orgánica en el suelo, y su equivalente el C sumido en el perfil edáfico, varía al cambiar las técnicas de cultivo, las explotaciones forestales, el desarrollo de la vegetación natural hacia estadios más estables, más sostenibles, próximos o en la clímax, o viceversa, y, en definitiva, con el cambio de las condiciones climáticas. La relación del clima con la materia orgánica (MO) del suelo ya la investigó Jenny (1930), relacionando los valores promedio de las precipitaciones y temperaturas medias anuales, con los contenidos en materia orgánica en Ap de suelos cultivados y es de buena ética científica recordarle, lo mismo que a Cardús, Lasala, Llovet (1974).

Siguiendo esa línea, investigamos la correlación en los suelos cultivados de secano de la provincia de Tarragona, entre precipitaciones, temperaturas medias y contenidos orgánicos reales de 1.400 muestras de suelo; con la evapotranspiración real de Thornthwaite y con la ecuación derivada del diagrama ombrotérmico de Gaussen, (Cobertera, 1983).

Los avances en la informática y en concreto de los SIG, permiten retomar esas experiencias y facilitar la cuantificación climática, a escala de detalle, realizada mediante los

valores de la evapotranspiración potencial o de referencia (ET_o) y del coeficiente de cultivo (K_c), siguiendo el método FAO (1998).

Así, en la investigación que realizamos, en 2015, en la zona semiárida del sur de Navarra, correspondiente al término municipal de Arguedas, zonas limítrofes de Valtierra y de la Comunidad de Bardenas Reales, dentro del Proyecto de I+D, nº 0011-1365-2015-000214 de FEDER y Gobierno de Navarra, partiendo del TFM dirigido por el Prof. Dr. Jorge Mongil, se calcularon los valores climáticos, para cada celda de 10x10 m, permitiendo alcanzar los resultados que exponemos en este trabajo.

2. Material y métodos

2.1. Los valores de la ET_o

La ET_o por pixel se ha calculado y cartografiado, a partir de los datos climáticos (promedio de 20 años desglosado por meses) de las Estaciones Meteorológicas de Bardenas-El Yugo, Tudela-Montes de Cierzo y Cadreita. Los parámetros interpolados, se han cartografiado en función de la altitud y orientación, mediante el Modelo Digital del Terreno del Instituto Geográfico Nacional (MDT), en celdas de 10x10 m, que contienen los valores de: las temperaturas medias, medias de las máximas y de las mínimas, máximas y mínimas absolutas; y la radiación solar. La velocidad del viento se obtuvo mediante datos del Mapa Eólico Nacional (2008) de CENER, con metodología SKIRON. Estos valores se operan con la ecuación de ET_o (FAO, *op. cit.*), dando el resultado de la Evapotranspiración de referencia, o potencial, para cada celda, como se muestra en el mapa de la Figura 1.

2.2. Los valores del K_c

Los coeficientes K_c de cada cultivo se calcularon mediante la referida metodología FAO, en base a los valores iniciales de K_c normalizados, recalculados en función de las técnicas agronómicas aplicadas, es decir: el calendario de los periodos de desarrollo vegetativo; las técnicas de año y vez; la irrigación, que representa un gran cambio en el clima influyente en la formación de materia orgánica en el suelo, como demostraron Apes-teguía *et al.* (2015) con ensayos en maíz de regadío y trigo de secano; y los rendimientos de cosecha, así como ajustes por salinidad. Estos valores de K_c se han distribuido por recintos, en función de los correspondientes usos agrarios cartografiados en las Ortofotos (1: 5.000) del Gobierno de Navarra y el CORINE 1: 50.000, de forma automática, con datos previos de campo. De esta forma se obtuvieron, en nuestra investigación, los coefi-

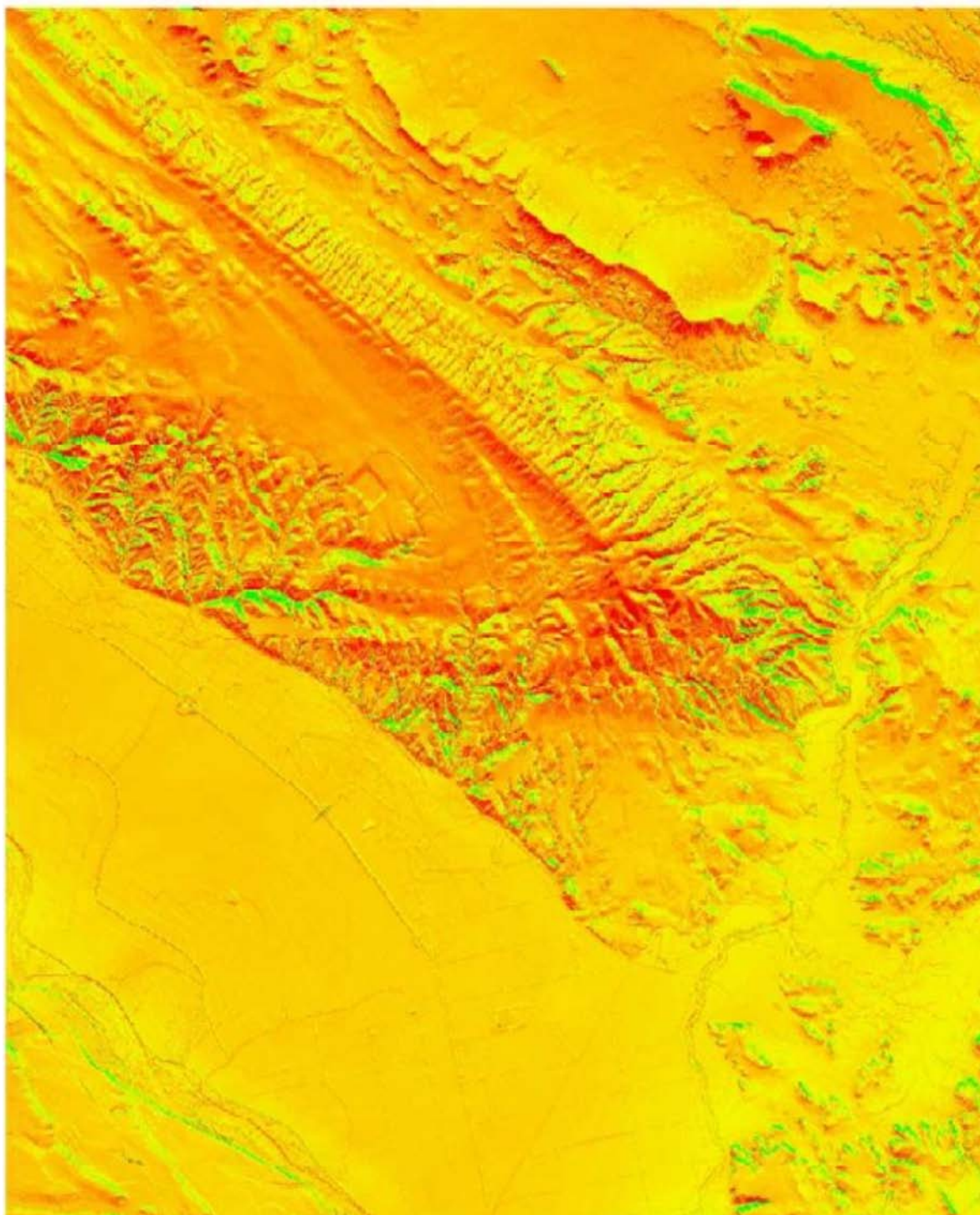
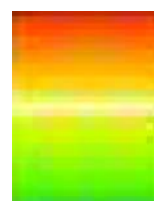


Figura 1: Mapa de la ETo en mm·día-1. Escala. Dimensiones equivalentes de la figura, en el terreno: 9.445 m de ancho x 11.844 m de alto

Leyenda: Rojo: 4,18511-3,91781; Naranja: 3,91781-3,65052;
Naranja claro: 3,65052-3,38323; Amarillo: 3,38323-3,11594;
Amarillo verdoso: 3,11594-2,84865; Verde claro: 2,84865-2,58136;
Verde intenso: 2,58136-2,31407 mm·día-1



cientes de cultivo (Kc), que pueden verse en la Tabla 1.

Tabla 1: Coeficientes Kc de los cultivos en la zona de estudio

CULTIVO	Kc
Huertas	0,8307
Maíz regadío	0,7178
Trigo regadío	0,5759
Arroz regadío	0,5464
Viña regadío	0,4335
Trigo seco (año y	0,3880
Viña seco	0,3281
Olivo seco	0,3154
Almendra seco	0,2632

Sin embargo, en los suelos con vegetación natural o repoblada, presenta mayor dificultad el cálculo del Kc, ya que las aplicaciones de FAO se circunscriben a los suelos agrícolas. Dificultades que hemos intentado subsanar mediante el cálculo del Kc de esa vegetación, teniendo en cuenta:

1°. Que en las series de vegetación (asociaciones vegetales y también en las formaciones), la concentración de materia orgánica en el horizonte A₁ aumenta a medida que la serie pasa de estadios juveniles a maduros y alcanza la clímax y viceversa (Mongil *et al.*, 2011).

2°. Que partiendo de unas condiciones climáticas determinadas, como se deduce del punto anterior, puede conocerse la sostenibilidad del bosque por las concentraciones de los nutrientes asimilables en el suelo que, según Blanco *et al.* (2004), desarrollan un comportamiento en el proceso de descomposición acoplado con el de la MO. A mayor sostenibilidad, mayor porcentaje de MO en el A₁. Lo que corrobora el punto anterior al coincidir madurez y sostenibilidad.

y 3°. Que existe una correlación entre la asimilación del C y la superficie foliar, como explican De Zavala *et al.* (2005), siguiendo a Farquhar *et al.* (2001).

Para evaluar la vegetación natural y repoblada se estableció una clasificación de las distintas series, a partir del mapa de usos del suelo del Gobierno de Navarra, con base en las ortofotos 1:5.000. Estas series se ordenaron de mayor a menor madurez, es decir desde las más a las menos próximas a la clímax y teniendo en cuenta su sostenibilidad:

- I.- La vegetación en evolución a encinares y/o coscojares. Sostenible y con tendencia al encinar clímax.
- II.- La vegetación de ribera sostenible.
- III.- Los pinares de repoblación, en terrazas, que facilitan una sostenibilidad implantada.
- IV.- La vegetación con poca evolución por las condiciones edáficas y topográficas desfavorables. Con problemas de sostenibilidad.

Siguiendo la tendencia por su estado de evolución, para poder cuantificar de forma automática el Kc de esta vegetación se utilizó el Mapa Forestal de España, 1:50.000 (MFE 50), corregido con los usos del suelo (vegetación) de las ortofotos 1:5.000 del Gobierno de Navarra. Creando áreas o recintos que corresponden a cada desarrollo de la vegetación, aprovechando los datos en porcentajes de las cubiertas vegetal total y arbolada (fctt y fcca). Teniendo en cuenta que a mayor cobertura vegetal, mayor estabilidad, mayor edafogénesis humificadora y, por lo tanto mayor Kc que concuerda con una mayor disponibilidad de agua efectiva, gracias a la propia resiliencia del sistema suelo, planta, clima.

Se ha partido de que las precipitaciones medias anuales (periodo de 20 años) son de 1,13 mm por día, lo que corresponde con un Kc promedio de 0,3275, resultado del déficit hídrico teórico para el promedio del territorio de estudio. Para ajustar este valor promedio, a las formaciones vegetales naturales, se utilizan los de la cubierta vegetal total y arbórea del mapa digitalizado MFE 50, que son parte del cálculo de la ETo, mediante la ecuación de la cobertura efectiva (FAO, op. cit.). La escala del MFE 50 resulta insuficiente para estudios a escalas de detalle; se ha solucionado este inconveniente trabajando con las ortofotos digitalizadas 1:5.000, del Gobierno de Navarra, que facilitan una adecuada definición de las formaciones vegetales, con los listados correspondientes. A esa información le hemos superpuesto los valores estandarizados de las coberturas del MFE 50, para rasterizar y poder operar por pixels.

Cuando la vegetación es >1,20 m de altura se considera arbórea y <1,20 m matorral, aplicándose los valores de $fcca$ y $fcct$ respectivamente, resultando el valor de Kc para cada porcentaje de cobertura vegetal. Si es mixta se promedian ambos valores. Los Kc correspondientes se indican en la Tabla 2.

Tabla 2: Kc para la vegetación natural y repoblada en función de la $fcct$ y $fcca$ por pixel.

factor Kc	$fcct$ %	Kc	factor Kc	$fcca$ %	Kc
1,25	100	0,40868823	1,3	100	0,42503575
11,2	91	0,3923407	1,25	91	0,40868823
1,15	81	0,37599317	1,2	81	0,39234070
1,1	71	0,35964564	1,15	71	0,37599317
1,05	61	0,34329811	1,1	61	0,35964564
1	51	0,32695058	1,05	51	0,34329811
0,95	41	0,31060305	1	41	0,32695058
0,9	31	0,29425552	0,95	31	0,31060305
0,85	21	0,27790799	0,9	21	0,29425552
0,8	11	0,26156046	0,85	11	0,27790799
0,75	1	0,24521294	0,8	1	0,26156046

Cuando en una celda existe arbolado y matorral o pastizal simultáneamente, se promedian los valores de cada cobertura ($fcct$ y $fcca$) para establecer el porcentaje que corresponde con el Kc , realizando las interpolaciones precisas si los % son distintos para cada una.

Un nuevo camino para cuantificar espacialmente las coberturas, mediante satélite, puede ser interesante, como indica el trabajo realizado por Navarro *et al.* (2010), calculando la superficie foliar de *Quercus ilex ballota* con imágenes LIDAR.

2.3. Método de cálculo del contenido en C en función de la ET_0 y el Kc

El cociente $Kc \cdot ET_0^{-1}$ tiene una relación, experimentada en los suelos cultivados, ya que la irrigación y otras técnicas y distribución temporal en periodos vegetativos (Kc) mul-

tipificada por ETo (clima) no es otra cosa que la evapotranspiración real (ETc), que condiciona el balance de MO en el suelo, lo que es consecuente con lo establecido por Coman & Farquhar (1977), al indicar que el cociente entre la asimilación neta de C y la transpiración vegetal es una constante.

2.3.1. Establecimiento de áreas homogéneas

La correlación es factible en espacios en los que las características climáticas, litológicas y de las técnicas de cultivo y vegetación natural, sean lo más homogéneas posibles. Los datos analíticos del contenido en C del suelo tiene dos fuentes: los análisis georreferenciados (del laboratorio del Gobierno de Navarra y del estudio edáfico de la Finca de Los Aguilares, propiedad de la Comunidad de Bardenas Reales de Navarra); y algunos análisis nuevos, ubicados en lugares que se consideran necesarios por corresponder a las áreas homogéneas sin información analítica, como en los suelos de vegetación natural e incluso repoblada. Esta homogeneidad se debe establecer creando áreas separadas según las características siguientes:

- Litología. Separando caliza y silíceas, por su distinto comportamiento en los procesos de humificación, como han estudiado: Fernández Ugalde (2010) en su Tesis y Fernández-Ugalde *et al.* (2011) donde establecen los procesos de estructuración favorecedores de la MO en suelos calizos, también experimentados durante varios años por Virto *et al.* (2011), Virto *et al.* (2013), Fernández-Ugalde *et al.* (2014) y en cultivos irrigados Apesteguía, *et al.*, (2015) y (Virto *et al.*, 2016), siempre en suelos semi-áridos de clima mediterráneo, irrigados o no, como los del territorio de este trabajo.
- Cultivos. Separando los no irrigados de los irrigados y, si es necesario, el tipo de laboreo ya que el no cultivo favorece la humificación, como investigaron Imaz *et al.* (2010) en suelos de secano semi-áridos (en nuestro caso no se practica siembra directa).
- Vegetación no cultivada. Separando la natural de la repoblada, siguiendo lo establecido en el apartado 2.2. respecto a la vegetación ordenada por su sostenibilidad.

2.3.2. Análisis georreferenciados, toma de muestras y analítica

Como promedio se ha utilizado una muestra de suelo por cada 2 km², siendo la mayoría antiguos análisis georreferenciados que dan el resultado en % de MO, conside-

rando que $\% C = \%MO \cdot 1,724^{-1}$. En las áreas sin análisis previos, se han tomado muestras hasta 15 cm de profundidad y se han analizado por oxidación, resultando directamente el % de C, con el método AFNOR y el de Walkley y Black, que no precisa fotocolorímetro (Cobertera, 1993).

2.3.3. Cálculo para obtener los contenidos de C en pixels de 10x10 m

Para calcular los valores de C en todas las celdas, se ha introducido en la herramienta informática una regresión cuadrática de la relación entre los contenidos de C (análisis georreferenciado del % de C en el suelo) y los valores microclimáticos, cuantificados con el cociente $Kc \cdot ETo^{-1}$ (que corresponden a la misma georreferencia y dentro de una misma área homogénea). Obteniendo así la parábola de mejor ajuste, siendo x el valor conocido de $Kc \cdot ETo^{-1}$ para cada pixel e y el contenido en % de C, en ese pixel. Se realiza el ajuste para cada área homogénea, siendo, por ejemplo, para una de ellas:

$$y = 1,83168174562 + 3,87504582803 \cdot x + 5,88995325473 \cdot x^2$$

De la que se deriva la ecuación siguiente, para operar en la hoja de cálculo, que nos permite conocer el % de C (y) del horizonte A₁ o Ap (potencia media 15 cm) de cada pixel, a partir de $x = Kc \cdot ETo^{-1}$, valor conocido correspondiente al mismo pixel.

$$y = -(3,87504582803 \cdot x + (-5,88995325473 \cdot (x^2))) - 1,83168174562$$

Se pasa el % de C a toneladas de C por hectárea, utilizando una densidad aparente de 1,45, concordante con la investigación de Bescansa, *et al.* (2006).

3. Resultados

Se consigue la distribución del C en t·ha⁻¹ para cada pixels de 10*10 m y el mapa correspondiente (Figura 2). En su leyenda se observa la distribución espacial de la sostenibilidad atribuida a las distintas cantidades de C en el suelo y los medios por su sostenibilidad-estabilidad (Cobertera, *ibidem*, 290-298). En los medios estables y sostenibles la cantidad de C oscila entre 51 y 40 t·ha⁻¹ de C. En los medios intergrados se puede mejorar su sostenibilidad si los valores están entre 40 y 33 t·ha⁻¹ de C. Esa posible mejora es más costosa cuando los valores están entre 33 y 20 t·ha⁻¹ de C. Los medios inestables que están entre 19 y 15 t·ha⁻¹ de C, no son sostenibles, sólo podrían mejorarse con grandes cambios en los usos y técnicas aplicados, como repoblación forestal en terrazas.

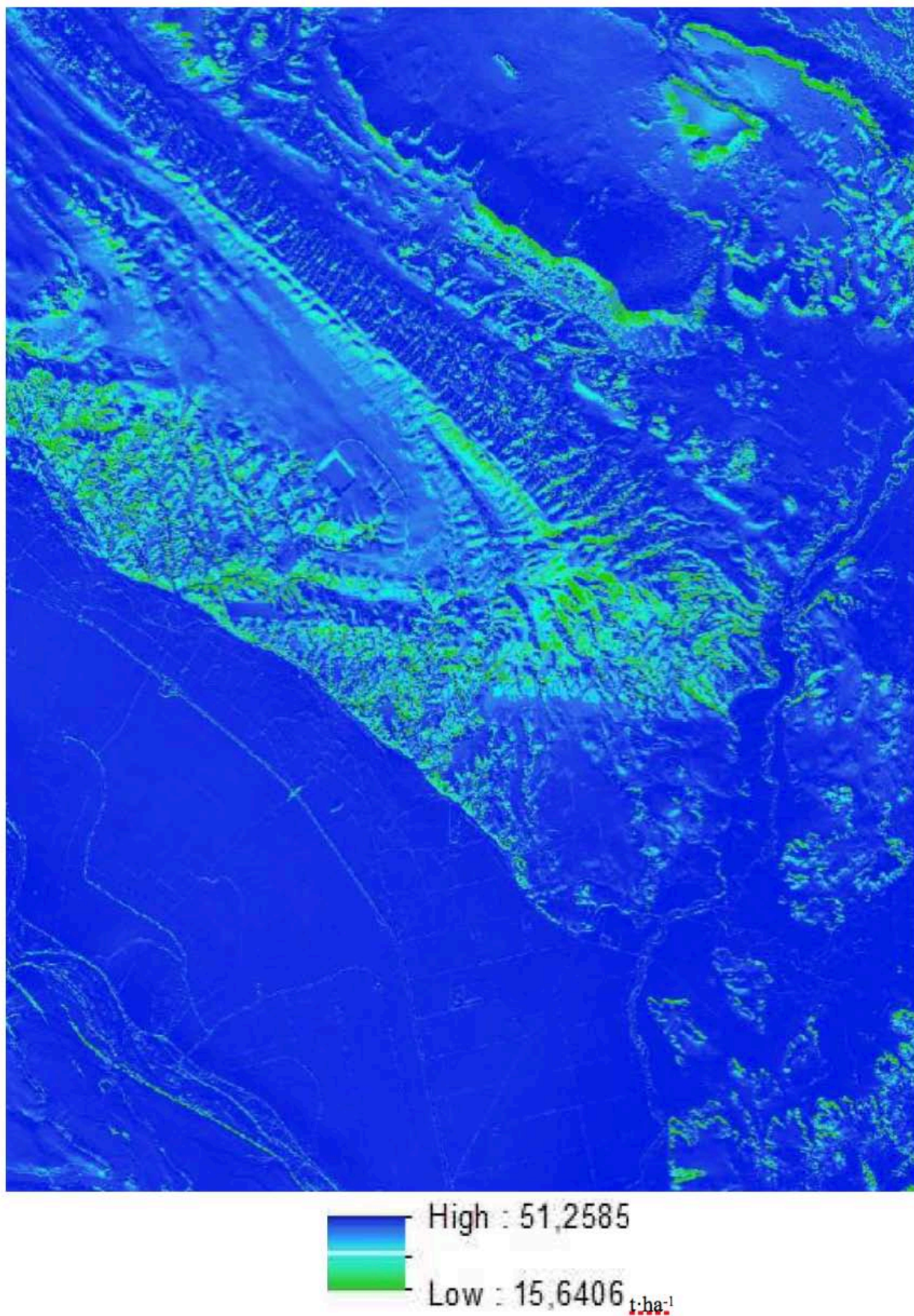


Figura 2: Mapa de C (t·ha⁻¹) en el horizonte A₁

Leyenda:

Los medios cartografiados tienen los usos del suelo y t·ha⁻¹ de C siguientes:

I.- Medios estables, sostenibles

Color: 3 tonalidades de azul de más a menos oscuro, en este orden:

1.- Matorral mediterráneo con *Quercus coccifera* y presencia de alguna *Quercus ilex baillota*. 51 a 47 t·ha⁻¹ de C.

2.- Bosques de ribera y cultivos de regadío en la terraza del Ebro, sin salinidad. 47 a 44 t·ha⁻¹ de C.

3₁.- Repoblaciones, en terrazas, de *Pinus halepensis* en estado fustal. 44 a 40 t·ha⁻¹ de C.

3₂.- Cultivos herbáceos de regadío, incluyendo arrozales, en la terraza del Ebro. 44 a 40 t·ha⁻¹ de C.

II.- Medios intergrados con edafogénesis algo superior a la morfogénesis, en rexistasia antrópica y climácica, tendencia a la consolidación de la sostenibilidad.

Color: 2 tonalidades de azul celeste:

4.- Matorral mediterráneo en evolución, con ejemplares de *Quercus coccifera* y algunos *Junipeus communis*. 40 a 37 t·ha⁻¹ de C.

5₁.- Repoblaciones, en terrazas, con *Pinus halepensis* en estado latizal. 37 a 33 t·ha⁻¹ de C.

5₂.- Cultivo moderno de viña en secano y almendros en estado de abandono o semi-abandono, al NO del territorio y de cereales de invierno en buenos suelos, situados al SE. 37 a 33 t·ha⁻¹ de C.

III.- Medios intergrados con morfogénesis algo superior a la edafogénesis, en rexistasia antrópica y climácica, sostenibilidad precaria.

Color: 1 tonalidad de azul celeste muy claro:

6₁.- Matorral mediterráneo poco denso, sin ejemplares de *Quercus coccifera*. 33 a 29 t·ha⁻¹ de C.

6₂.- Repoblaciones, en terrazas, con *Pinus halepensis* en estado latizal o monte bravo. 33 a 29 t·ha⁻¹ de C.

III bis.- Medios intergrados con morfogénesis algo superior a la edafogénesis, en rexistasia antrópica y climácica, poco sostenibles.

Color: 3 tonalidades de azul verdoso:

7.- Repoblaciones con *Pinus halepensis* en estado latizal o monte bravo. 29 a 26 t·ha⁻¹ de C.

8.- Repoblaciones, en terrazas, con *Pinus halepensis* en estado monte bravo. 26 a 22 t·ha⁻¹ de C.

9₁.- Tierras de labor de secano en año y vez. 22 a 19 t·ha⁻¹ de C.

9₂.- Matorrales muy poco densos y espartales en suelos salinos. 22 a 19 t·ha⁻¹ de C.

IV.- Medios muy inestables en rexistasia climácica dominante, no sostenibles.

Color: 1 tonalidad verde:

10.- Matorrales muy poco densos, en formaciones de cárcavas con litosuelos y regosuelos yesosos con elevadas pendientes y en los pies de vertiente salinos. 15 t·ha⁻¹ de C.

4. Discusión

La metodología ensayada podría adaptarse a cualquier territorio, pero sólo puede considerarse aplicable en climas mediterráneos semiáridos, precisando ajustes para otras condiciones climáticas.

5. Conclusiones

La correlación entre la estabilidad de los medios y las cantidades de C en el suelo, permite facilitar los proyectos y trabajos de captura de C y mejora la sostenibilidad, ahorrando análisis de suelos y prospecciones de campo.

Los porcentajes de materia orgánica en A₁ o Ap significan el estado de evolución edáfica y resiliencia con el clima y la vegetación. Los valores de $Kc \cdot ET_0^{-1}$, corresponden con valores climáticos, que se pueden cuantificar con la analítica del C de los suelos y con las asociaciones vegetales y técnicas de cultivo.

El método puede utilizarse como herramienta predictiva, ya que al cambiar cualquiera de los parámetros climáticos, de los usos del suelo o de las tecnologías aplicadas en el mismo, como por ejemplo la irrigación, se obtienen los resultados de la variación espacial de los contenidos en MO. Se puede así conocer la evolución de la edafogénesis y testar su correlación con los propios usos del suelo, para ver su viabilidad ecológica o la necesidad de cambio de los mismos. El conocimiento de los incrementos de C del suelo al cambiar los usos y técnicas permiten cuantificar el sumidero y comparar los balances con las cantidades de gases de efecto invernadero causados por las posibles mejoras.

6. Bibliografía

- Apesteuguía, M. Virto, I. Orcaray, L. Enrique, A. y 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.
- Bescansa, P. Imaz, M.J. Virto, I. Enrique, A. y Hoogmoed, W.B. 2006. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. *Soil Till. Res.*, 87: 19-27.

- Blanco, J.A. De Zavala, M.A. Imbert, J.B. y Castillo, F.J. 2004. Sostenibilidad de las prácticas forestales en masas de *Pinus halepensis* L. en el pirineo navarro. Evaluación mediante un modelo de proceso. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.*, 18: 41-46.
- Cardús, J. Lasala, M. y Llovet, J. 1974. Posibilidades de control de la fertilización a través del análisis del suelo. *Boletín Agro-Pecuario Caja de Pensiones*, 43-58.
- Cobertera, E. 1983. Relación entre la aridez y los contenidos orgánicos de los suelos cultivados de la provincia de Tarragona. En: *Avances sobre la investigación en bioclimatología, VIII Reunión de Bioclimatología*, Aula Dei, Zaragoza.
- Cobertera, E. 1993. *Edafología aplicada*. Cátedra, Madrid.
- Cowan, I.R. y Farquhar, G.D. 1977. Stomatal function in relation to leaf metabolism and environment. En: *Integration of activity in the higher plant*. Jennings D.H. (ed.), Cambridge University Press, 471-505.
- De Zavala de, M.A. Urbieto, I.R. Bravo de la Parra, R. y Angulo, O. 2005. Modelos de proceso de la producción y dinámica del bosque mediterráneo. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.*, 14(3), 482-496.
- FAO. 1998. Evapotranspiración de los cultivos. En: *Estudios FAO 56, Riego y Drenaje*. FAO, Roma.
- Farquhar, G.D. Von Caemmerer, S. y Berry, J.A. 2001. Models of photosynthesis. *Plant Physiol.*, 125(1): 42-5.
- Fernández-Ugalde, O. Virto, I. Barré, P. Apesteguía, M. Enrique, A. Imaz, M.J. y Bescansa, P. 2014. Mechanisms of macroaggregate stabilisation by carbonates: implications for organic matter protection in semi-arid calcareous soils. *Soil Research*, 52: 180-192.
- Fernández-Ugalde, O. Virto, I. Barré, P. Gartzia-Bengoetxea, N. Enrique, A. Imaz, M.J. y Bescansa, P. 2011. Effect of carbonates on the hierarchical model of aggregation in calcareous semi-arid Mediterranean soils. *Geoderma*, 54: 203-214. Erratum in *Geoderma*, 166: 214-216.
- Fernández Ugalde, O. 2010. *Physical quality and organic matter stabilization in semi-arid agricultural soils in the Ebro Valley*. Tesis Doctoral. Universidad Pública de Navarra.
- Imaz, M.J. Virto, I. Bescansa, P. Enrique, A. Fernández-Ugalde, O. y Karlen, D.L. 2010. Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. *Soil & Tillage Research*, 107: 17-25.

- Jenny, H.A. 1930. Study on the influence of climate upon the nitrogen and organic matter content of the soil. *Montana Agr. Sta. Res. Bull.*, 152.
- Mongil, J. Martín, L. Navarro, J. y Martínez de Azagra, A. 2011. Series de vegetación, números de curva y disponibilidades hídricas. Aplicación a la restauración forestal en zonas secas. En: *Forest Systems* , 21(1): 53-63.
- Navarro, R.M. Sánchez de la Orden, M. y Gómez, J. 2010. Aplicación de imágenes LIDAR para la estimación del índice de superficie foliar (LAI) en encinas (*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* (Desf.) Samp.). *Forest Systems*, 19(1): 61-69.
- Virto, I. Antón, R. Arias, N. Orcaray, L. Enrique, A. y Bescansa, P. 2016. A regional field-based assessment of organic C sequestration and GHG balances in irrigated agriculture in Mediterranean semi-arid land. En: *EGU General Assembly 2016* (eds.), Geophysical Research Abstracts Vol. 18, EGU2016-17730.
- Virto, I. Fernández-Ugalde, O. Barré, P. Imaz, M.J. Enrique, A. Bescansa, P. y Poch, R.M. 2013. Micromorphological analysis on the influence of the soil mineral composition on short-term aggregation in semi-arid Mediterranean soils. *Spanish Journal of Soil Science*, 3(2): 116-129. DOI: 10.3232/SJSS.2013.V3.N2.07.
- Virto I. Gartzia-Bengoetxea, N. y Fernández-Ugalde, O. 2011. Role of organic matter and carbonates in soil aggregation estimated using laser diffractometry. *Pedosphere*, 21(5): 566-572.