



Estimación de la relación de pérdida de suelo para el cultivo de colza (*Brassica napus*) a partir del modelo USLE/RUSLE en Uruguay

Olivera G¹, Ferreira G¹, Pérez M², Clérico C²

¹Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Dirección General de Recursos Naturales, División Suelos y Aguas. Avenida Garzón 456, C.P. 12900, Montevideo, Uruguay. Email: gferreira@mgap.gub.uy

²Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas. Avenida Garzón 780, C.P. 12900, Montevideo, Uruguay.

Recibido: 28/11/2018 - Aceptado: 17/06/2019

Resumen

En Uruguay, desde 1981 existe un marco legal que declara de interés nacional promover y regular el uso y la conservación de los suelos y las aguas superficiales destinados a fines agropecuarios. En este marco se han implementado los «Planes de Uso y Manejo del Suelo» (PUMS) como norma técnica que regula el uso del suelo. En el cumplimiento de esta normativa, se estima la pérdida de suelo por erosión de determinado uso y manejo, con el programa EROSIÓN 6.0, basado en la USLE/RUSLE, en el que cada cultivo tiene su factor de Relación de Pérdida de Suelo (RPS). Para las condiciones de producción de Uruguay, el cultivo de colza (*Brassica napus* L.) no cuenta con el factor antes mencionado. El objetivo de este trabajo fue determinar la RPS de colza, para cada periodo del cultivo (PC). Durante cuatro años se recolectaron datos en chacras comerciales y experimentales ubicadas en el litoral oeste de Uruguay. Los valores promedio de RPS obtenidos para el PC1, PC2, PC3 y PC4 fueron 0,142, 0,079, 0,032 y 0,040, respectivamente. La variabilidad de los valores de RPS en PC1 y PC4 fue explicada por la cobertura del suelo por residuos (CR) solamente ($RPS_{PC1} = 0,6772 e^{-0,028CR}$ y $RPS_{PC4} = 0,4221 - 0,0091CR + 0,00005CR^2$, respectivamente), mientras que en PC2 y PC3 fue explicada por la CR más la cobertura aérea (CobA) del propio cultivo ($RPS_{PC2} = 0,38 - 0,0049CR + 0,000019CR^2 - 0,000018CobA^2$ y $RPS_{PC3} = 0,225 - 0,00237CR - 0,00084CobA + 0,00001CR^2$, respectivamente).

Palabras clave: RPS, colza, suelos, erosión, factor C

Estimation of Soil Loss Ratio for Rapeseed Crop (*Brassica napus*) from the USLE/RUSLE Model in Uruguay

Summary

In Uruguay, since 1981 there is a legal framework by which it is declared of national interest to promote and regulate the use and conservation of soils and surface waters destined to agricultural purposes. In this framework, the «Land Use and Management Plans» (PUMS) have been implemented as a technical norm that regulates land use. In compliance with this regulation, the loss of soil due to erosion of certain use and management is estimated with the EROSION 6.0 program, based on the USLE/RUSLE, in which each crop has its Soil Loss Ratio factor (RPS). For the production conditions of Uruguay, the rapeseed crop (*Brassica napus* L.) does not have the aforementioned factor. The objective of this work was to determine the RPS of rapeseed, for each crop period (CP). For four years data was collected from commercial farms and experimental sites located on the western coast of Uruguay. The average RPS values obtained for PC1, PC2, PC3 and PC4 were 0.142, 0.079, 0.032 and 0.040, respectively. The variability of the RPS values in PC1 and PC4, was explained by the soil cover by residues (CR) only ($RPS_{PC1} = 0.6772e^{-0.028CR}$ and $RPS_{PC4} = 0.4221 - 0.0091CR + 0.00005CR^2$, respectively), while in PC2 and PC3 it was explained by the CR more air coverage (CobA) of the crop itself ($RPS_{PC2} = 0.38 - 0.0049CR + 0.000019CR^2 - 0.000018CobA^2$ and $RPS_{PC3} = 0.225 - 0,00237CR - 0.00084CobA + 0.00001CR^2$, respectively).

Keywords: SLR, oilseed rape, soils, erosion, c factor

Introducción

En Uruguay, desde 1981 existe un marco legal por el cual se declara de interés nacional promover y regular el uso y la conservación de los suelos y las aguas superficiales destinados a fines agropecuarios. En este marco, el Programa de Conservación de Suelos dirigido por la Dirección General de Recursos Naturales del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, sumado a la regulación del cumplimiento normativo de Buenas Prácticas de Manejo para abordar el uso racional del suelo y el agua⁽¹⁾, ha implementado los «Planes de Uso y Manejo del Suelo»⁽²⁾, obligatorios a partir de 2013⁽³⁾. Esta política pública está orientada a reducir el riesgo de erosión de suelos relacionado con la actividad agropecuaria, degradación física señalada como uno de los principales problemas ambientales del país⁽⁴⁾. Por otra parte, el sector productivo ha adoptado el empleo de algunos cultivos agrícolas de los que no existe información nacional relacionada con su efecto sobre la conservación de suelos. En este sentido, se encuentra el cultivo de colza, cuya superficie de siembra ha pasado de 10.000 a 53.000 hectáreas en el período 2014-2017⁽⁵⁾.

En el cumplimiento de esta normativa, con el fin de estimar la pérdida de suelo por erosión que se genera en rotaciones agrícolas, se utiliza la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)⁽⁶⁾ y su versión revisada, RUSLE⁽⁷⁾. El factor C de la USLE/RUSLE estima la incidencia del uso y manejo del suelo de acuerdo con la ecuación 1:

$$\text{Factor C} = \text{RPS}_i \times \text{EI30}_i \quad (1)$$

Siendo:

RPS_i = relación de pérdida de suelo de un cultivo durante el período i .

EI30_i = proporción de EI30 anual que ocurre en el período de cultivo (PC) i .

Los valores de RPS_i utilizados en la ecuación 1 son específicos de cada cultivo que componen la rotación y se determinan por períodos del cultivo (PC), definidos por el cambio en la efectividad de la cobertura del suelo y en los que la protección es relativamente uniforme⁽⁸⁾:

- PC_0 o F: barbecho rugoso, tiempo desde el laboreo primario hasta la siembra.
- PC_1 : siembra y emergencia, abarca hasta los 30 días luego de la siembra.

- PC_2 : establecimiento del cultivo, abarca hasta los 30 días desde que finaliza PC anterior.
- PC_3 : crecimiento y maduración, abarca desde que finaliza PC anterior hasta la cosecha.
- PC_4 : barbecho-rastrajo, abarca desde que finaliza PC_3 anterior hasta la siembra del siguiente cultivo.

En caso de laboreo reducido y siembra directa el PC_0 o F no se considera al estimar Factor C.

En la RUSLE⁽⁷⁾, cada PC tiene un valor de RPS determinado con la ecuación 2:

$$\text{RPS} = \text{UP} \cdot \text{CV} \cdot \text{CR} \cdot \text{R} \cdot \text{CA} \quad (2)$$

Siendo:

UP = subfactor uso previo.

CV = subfactor cobertura vegetal.

CR = subfactor cobertura por residuos.

R = subfactor rugosidad superficial.

CA = subfactor contenido de agua.

Si bien el valor de RPS es específico de cada cultivo, está influenciado por el uso previo del suelo (subfactor UP), por el hecho de que la ecuación RUSLE aplica para una rotación de cultivos y no para un solo cultivo. En tal sentido⁽⁹⁾, evaluaciones de la cobertura de suelo por residuos a la siembra de cultivos de verano (PC_1) en chacras comerciales reportaron que el antecesor inmediato fue significativo en el comportamiento de la variable. Además, el efecto del antecesor inmediato sobre la cobertura de suelo también fue significativo cuando se considera su interacción con el uso del suelo de hasta dos inviernos anteriores a la siembra de los cultivos de verano referidos. Los cultivos que componen una rotación se diferencian por la cantidad de residuos que dejan en el suelo, así como en la calidad de dichos residuos⁽¹⁰⁾. Lo mencionado anteriormente toma importancia en este trabajo debido a que la materia seca (MS) sobre el suelo es el factor más importante en reducir la RPS en el PC_1 ⁽¹¹⁾.

El subfactor UP considera los contenidos de raíces vivas y residuos de cultivos anteriores en los primeros 10 a 12 cm de suelo. En este sentido⁽¹²⁾⁽¹³⁾, entre el 66 % y el 80 % de las raíces de colza se desarrollan en los primeros 20 cm de profundidad. Por otra parte, se ha reportado⁽¹⁴⁾ que entre 79 % y 94 % del total del sistema radicular se concentra en los primeros 9 cm de suelo para estadios fenológicos comprendidos entre C2 y G5 en la escala de Cetiom⁽¹⁵⁾, en suelos similares a los de Uruguay. El au-

mento de la densidad de plantas hasta 200 pl.m² incrementó la cantidad de raíces en los primeros 10 cm de suelo, mientras que densidades mayores tuvieron una disminución en la masa de raíces⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾. De acuerdo con estos autores, densidades de 66 pl.m² podrían aportar hasta 3,1 Mg.ha⁻¹ de MS de raíces en los primeros 10 cm de suelo, al final de la floración. Chamorro y Tamagno⁽¹⁴⁾ reportaron para los primeros 9 cm de suelo proporciones de MS de raíces acumulada de 12, 32, 60 y 100 % del total acumulado en ese estrato a floración (1,5 Mg.ha⁻¹ de MS de raíces), para los estadios fenológicos C2, F1, G3 y G5 (escala Cetiom⁽¹⁵⁾), respectivamente.

Se ha reportado que la relación MS aérea/MS raíz (MSa/MSr) varió en relación con el estadio fenológico, siendo 6, 11, 9 y 5 en los estadios C2, F1, G3 y G5 (escala Cetiom⁽¹⁵⁾), respectivamente⁽¹⁴⁾. Otros autores⁽¹²⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾ reportaron que esta relación varió entre 3,6 y 13 en G5 (escala Cetiom⁽¹⁵⁾).

Según varios autores⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾, el índice de cosecha (IC) del cultivo oscila entre 0,15 y 0,35. A nivel nacional los resultados obtenidos para esta variable están dentro de ese rango reportado⁽²²⁾⁽²³⁾ para la variedad Rivette, valor estable independientemente del nivel de rendimiento.

Además de la cobertura generada por residuos en superficie, el aporte de cobertura del suelo por la parte aérea de los cultivos también tiene un marcado efecto en reducir las pérdidas por erosión⁽²⁴⁾. Además, los efectos de ambas coberturas mencionadas se sustituyen, ya que la variación de cualquiera de ellas tiene bajo efecto cuando la otra presenta un valor alto.

En sistemas de producción agrícola de Uruguay⁽²⁵⁾ se obtuvo que a la siembra de un cultivo de verano posterior a colza, el 79 % del residuo total sobre superficie estuvo suelto y 21 % anclado. En esos resultados, el residuo suelto fue la principal fuente de variación de la CR a la siembra del cultivo de verano (PC₁). Además reportaron que fue necesario acumular al menos 4,3 Mg.ha⁻¹ de MS de residuo suelto de colza, para alcanzar 70 % de CR en el PC₁ de cultivos de verano. La MS requerida que indicaron estos autores tiene niveles de magnitud similares a lo reportado por Ferreira y Ferreira⁽⁹⁾, quienes propusieron el siguiente modelo (Ecuación 3) para estimar la CR en el PC₁ con base en la MS acumulada en superficie:

$$Cs_3 = 95,6 \times (1 - 1,05e^{-0,00029MS}) \quad (3)$$

Donde:

Cs3: Porcentaje de cobertura del suelo a la siembra del cultivo de verano (CR).

MS: materia seca de rastrojo promedio por sitio, en kgMS.ha⁻¹

Con base en la ecuación 3, Ferreira y Ferreira⁽⁹⁾ estimaron necesario al menos 4,7 Mg.ha⁻¹ de MS de residuos para que la CR alcance 70 % en el PC1 del cultivo de verano.

Con respecto a valores de RPS para el cultivo de colza, a nivel nacional no hay reportes. Sin embargo a nivel internacional se encuentran algunas referencias de valor medio de RPS de 0,210 para *Brassica campestris* L., en sistemas que combinan dos y tres cultivos anuales⁽²⁶⁾ y un valor medio de RPS de 0,360 para sistemas con doble cultivo anual (colza - maíz o colza - arroz).

Ante la realidad productiva y la ausencia de información nacional específica para el cultivo de colza, el objetivo de este trabajo fue determinar las RPS del cultivo de colza para los diferentes PC empleados por el modelo USLE/RUSLE, tomando en cuenta la tecnología de cosecha adoptada en condiciones comerciales de producción y, además, explorar relaciones entre la RPS y las variables que la determinan para estimar la RPS a partir de menos variables que las utilizadas en la ecuación 2.

Materiales y métodos

La recolección de datos de campo se realizó entre los años 2014 y 2017 inclusive, comprendió chacras comerciales ubicadas en los departamentos de Paysandú y Río Negro y sitios experimentales en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC - UDELAR), totalizando 31 sitios. Los suelos representativos de estos sitios son Brunosoles Éutricos Típicos Fr a LAc de las Unidades de suelo San Manuel y Young⁽²⁷⁾ y Brunosoles Subéutricos Típicos Ar de la Unidad de suelo Algorta⁽²⁷⁾.

Los sitios evaluados comprendieron diferentes aspectos del manejo agronómico, como tipos de colza (invernales y primaverales), variedades e híbridos (Rivette, Hyola 575 y Exp. 119), fecha de siembra, densidad y distancia de siembra, manejo del suelo (combinación de laboreo reducido – siembra directa y/o siembra directa) y forma de cosecha (directa o hilerada). La densidad media de plantas de todos los sitios fue 66 pl.m² (mín. 16 pl.m² y máx. 163 pl.m²).

Se determinó la cobertura por residuos del suelo⁽²⁸⁾, cobertura por parte aérea⁽²⁹⁾, altura de la vegetación y ru-

gosidad al azar⁽³⁰⁾ en diferentes momentos, a los efectos de estimar los distintos factores de la Ecuación 2.

Las determinaciones durante el crecimiento del cultivo se realizaron desde la siembra y cada 15 días para el PC1 y PC2, luego cada 30 días hasta la cosecha para el PC3. La frecuencia de determinaciones poscosecha, representativas del PC4, dependió de la fecha de siembra del cultivo de verano (cultivo de segunda), por esta razón en algunos sitios se realizó una sola medición. Para este último PC se distinguió entre cosecha hilerada (PC4_{CH}) y directa (PC4_{CD}). En cada instancia de medición y para cada sitio se realizaron tres repeticiones. En todos los casos se registró el estadio fenológico del cultivo de acuerdo con la escala Cetiom⁽¹⁵⁾. La selección de los sitios de muestreo en cada chacra y parcela fue realizada con base en los siguientes criterios: i) se descartaron bordes de cultivos, ii) zonas con huelleado evidente, iii) zonas con dos o más hileras sembradas de cultivo de colza, iv) zonas con acumulación de rastrojo (producto de obstrucción de cosechadoras), y v) áreas donde el cultivo tenía pobre desarrollo respecto al estado general de la chacra o parcela.

Para PC4_{CH}, se determinó el espacio entre gavillas y el ancho de estas, espacios ocupados por cola de trilla y entre cola de trilla. Esto permitió ponderar los valores de RPS obtenidos en esas situaciones. Para el caso de PC4_{CD} la distribución de restos fue más errática y no se ponderaron zonas de cola de trilla y entre cola de trilla. Para esta tecnología de cosecha se definieron zonas de alta, media y baja cobertura de suelo en cada sitio, perpendiculares a la dirección de cosecha.

Para estimar el subfactor UP (raíces vivas y restos en 10 a 12 cm de profundidad del suelo), se estimó la MS de raíces del cultivo con base en el rendimiento en grano de la chacra comercial o parcela experimental. A estos efectos se utilizó un IC de 0,32⁽²²⁾ o el correspondiente a la parcela en el caso de sitios experimentales donde fue determinado y una relación MSa/MSr variable, según cada estadio fenológico⁽¹⁴⁾. No se consideraron pérdidas de rendimiento debido a caída fisiológica de grano, método de cosecha o daños por aves.

La estimación del subfactor CV requirió conocer la proporción de la superficie del suelo cubierta por la parte aérea de la vegetación (CobA) y la altura de la misma. Esta última variable se tomó con cinta métrica en 12 plantas al azar, alrededor del punto de muestreo de cobertura y rugosidad, en cada repetición. Para los PC1, PC2 y PC3 se

tomó como referencia la hoja más alta de la planta seleccionada, en tanto para el PC4 se tomó la hoja más alta que tenía el tallo de la planta seleccionada o en su defecto la altura de corte del tallo.

Las determinaciones de CR y R se hicieron en el mismo lugar y en forma perpendicular a la línea de siembra. Para el subfactor R se determinó la diferencia de altura (Δh) entre los orificios 1 y 33 del rugosímetro, utilizando una cinta métrica. Cuando el Δh evidenció pendientes del tramo superiores a 0,5 %, generadas por estar posicionado en laderas fuertes u otros factores no identificados, se realizó una corrección lineal de la lectura de altura (h) para cada orificio, con el objetivo de disminuir el error al estimar la rugosidad natural del terreno. Para esto se corrigió la altura observada en cada orificio (h_o) con la siguiente ecuación: $h = h_o \pm (\Delta h / 33 * n.º \text{ de orificio a corregir})$.

El subfactor CA toma valor uno cuando el contenido de agua en el suelo es igual o mayor a capacidad de campo, y valor cero si es menor o igual a marchitez permanente, hasta 1,2 m de profundidad⁽³¹⁾⁽³²⁾. Este subfactor es determinante en la estimación de pérdida de suelo, pudiendo sobrestimar la misma respecto a lo medido en parcelas experimentales⁽³¹⁾⁽³²⁾⁽³³⁾. Para el presente trabajo se consideró CA = 1.

Los valores de RPS generados a los 30 DPS se utilizaron para determinar el valor promedio de esta variable en los PC1 y PC2, siendo utilizados como valor final e inicial, respectivamente. Con los generados a los 60 DPS se procedió de igual forma para los PC2 y PC3.

Una vez estimados los valores de RPS para cada PC mediante la ecuación 2, se estudió su relación con las variables CR y CobA mediante regresión no lineal (PC1, PC2, PC4) y regresión lineal múltiple (PC3). Para cada período se ajustaron ambas regresiones mencionadas anteriormente utilizando la combinación de ambas variables y sus términos de primer y segundo grado. De los modelos posibles (datos no mostrados) se seleccionaron aquellos con mayor coeficiente de determinación (R^2) y/o los de menor cuadrado medio del error (CME), AIC o BIC según fuera el caso. Con estas regresiones se buscó ajustar el valor de RPS para cada PC en función de los valores de suelo cubierto por residuos y cobertura aérea, con el objetivo de estimar el factor C en función de esas variables en el modelo EROSION 6.0⁽³⁴⁾.

Validación cruzada aleatoria de los modelos de predicción propuestos

Para todos los modelos de regresión seleccionados como mejores predictores de la RPS en cada PC, se procedió a realizar análisis de validación cruzada aleatoria utilizando dos subpoblaciones aleatorias de datos de entrenamiento (Ent_50 y Ent_75 para el 50 y 75 % de la población original, respectivamente), con los que se volvió a ajustar los modelos de regresión y obtener nuevos coeficientes para cada término. Para el caso de las regresiones lineales se incluyeron los términos polinómicos de 2º orden y se utilizó el método de selección de modelo *stepwise* para llegar al mejor ajuste. Con estos nuevos coeficientes se volvieron a estimar los valores de RPS para la población no utilizada en el paso anterior, datos de prueba (Pru_50 y Pru_25 para el 50 y 25 % de la población original, respectivamente).

La verificación de los ajustes de los modelos se realizó a partir de dos herramientas, (i) el gráfico de línea 1:1 y (ii) la relación de la raíz del cuadrado medio del error, RCME (%), con la media del valor observado de RPS.

Resultados y discusión

RPS promedio para cada período de cultivo

Los valores medios de RPS oscilaron entre 0,142 y 0,032 para PC1 y PC3, respectivamente. La RPS media para PC4_G fue 0,04, siendo 20 % menor en PC4_{CH} y 38 % mayor en PC4_{CD} (cuadro 1).

Los valores promedio de CR fueron iguales o superiores a 69 % en todos los PC (Cuadro 1) y fueron en au-

mento conforme avanzó el ciclo del cultivo, posiblemente por la muerte de hojas basales del cultivo en PC₃. Valores por debajo de 70 % redundan en significativas pérdidas de suelo por erosión⁽²⁹⁾. Para el PC1 y PC2, si bien el promedio fue 69 %, existió un 40 % de las observaciones con valores inferiores a 70 % de CR (Figura 1), pero los valores de RPS promedio obtenidos para estos dos primeros PC sin embargo fueron muy diferentes entre sí, 0,142 vs. 0,079 para PC1 y PC2, respectivamente. Dado lo anterior y la diferencia en los porcentajes de CobA (Cuadro 1) de estos PC, queda en evidencia que los primeros períodos del ciclo del cultivo son los que dejan el suelo más expuesto al efecto de la erosión, cobrando importancia la obtención de cultivos de colza con rápido crecimiento en etapas iniciales, que logren una rápida cobertura aérea del suelo y por esta vía contribuir a la reducción de pérdida de suelo⁽²⁴⁾.

En el PC4, la CR estuvo dada por la acumulación de residuos de los cultivos antecesores, sumándose en este los aportados por el propio cultivo de colza, por lo cual la cobertura del suelo aumentó respecto a los PC anteriores (Cuadro 1). Para este PC, el 80 % de las observaciones tuvieron valores de CR superiores a 70 % (Figura 1), con un valor promedio de 84 %.

Estos valores de cobertura observada son elevados, pero deben tomarse para la duración del PC4 del presente trabajo, que no fue mayor a 23 días. En condiciones comerciales, este último período es seguido en forma inmediata por un cultivo de verano, resultando en plazos cortos para que la descomposición de restos reduzca la cobertura de suelo por residuos de este cultivo.

Cuadro 1. Estadística descriptiva de los valores de RPS, cobertura de suelo por residuos (CR) y cobertura aérea (CobA), para cada período del cultivo de colza (PC) del modelo USLE/RUSLE.

PC	n	RPS	CV %	RPS	RPS	% CR	% CobA
		Promedio		Min	Max	Promedio	Promedio
1	60	0,142	94	0,039	0,452	69	18
2	72	0,079	122	0,007	0,405	69	53
3	126	0,032	114	0,005	0,241	75	89
4 _G	120	0,04	105	0,005	0,292	84	40
4 _{CH}	75	0,032	83	0,005	0,158	83	57
4 _{CD}	45	0,055	106	0,012	0,292	86	11

n: n.º de observaciones; 4_G: comprende valores de RPS para los métodos de cosecha hilerada y directa; 4_{CH}: valores de RPS en PC4 bajo cosecha hilerada; 4_{CD}: valores de RPS en PC4 bajo cosecha directa.

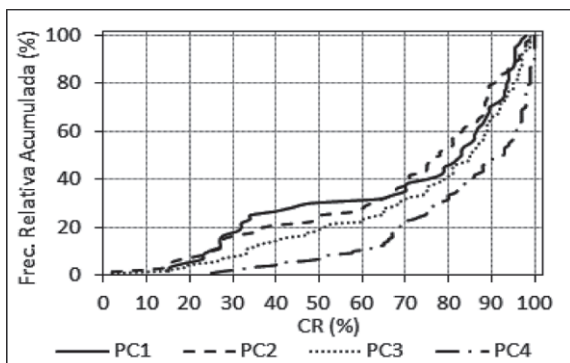


Figura 1. Frecuencia relativa acumulada del porcentaje de cobertura de suelo por residuos (CR) observados para cada período de cultivo (PC) de colza.

Aplicando el modelo de la ecuación 3⁽⁹⁾, considerando un IC de 0,32⁽²²⁾ y un rendimiento de grano de 1,7 Mg.ha⁻¹ (promedio de las chacras comerciales de este trabajo), el aporte estimado de residuos de colza fue de 3,7 Mg.ha⁻¹. Por tanto, para lograr 70 % de cobertura en el PC1 del cultivo siguiente⁽²⁹⁾, sería necesaria la acumulación de 1 Mg.ha⁻¹ de rastrojo residual provenientes de los componentes de la rotación que anteceden a colza, sugiriendo que este cultivo por sí solo no mantendría niveles de cobertura aceptables. En el caso de los sitios de este trabajo, que alcanzaron un promedio de 84 % de CR para el PC4, el aporte de rastrojo residual acumulado por la rotación se estimó en 3,6 Mg.ha⁻¹.

Los valores promedios de RPS para cada PC obtenidos en el presente trabajo deben considerarse en un contexto de inclusión del cultivo de colza en rotaciones que aseguren altos niveles de cobertura de residuos en el sistema, como fue reportado en trabajos de investigación en Uruguay⁽⁹⁾, para evitar el aumento en valores de la RPS por disminución en la CR.

Considerando el ciclo de cultivo entre PC1 y PC3, el valor medio de RPS en este trabajo fue 0,084, inferior a lo estimado en trabajos internacionales⁽²⁶⁾. Si bien esto solamente resalta la importancia del contar con calibraciones locales, no deja de ser una referencia internacional para el mismo cultivo.

El método de cosecha no afectó los valores de RPS en PC₄, pero sugieren que deberían ser contemplados en próximos estudios.

Determinación de la RPS en función de cobertura por residuos (CR) y aérea (CobA)

Se logró ajustar el valor de RPS para cada PC en función de los valores de suelo cubierto por residuos y cobertura aérea mediante regresiones lineales y no lineales. La variabilidad de los valores de RPS del PC1 fue explicada por el modelo representado en la ecuación 4 (CME = 0,0012 y R² = 0,94), siendo CR la única variable retenida en el modelo (p valor ≤ 0,05).

$$RPS_{PC1} = 0,6772e^{-0,028CR} \quad (4)$$

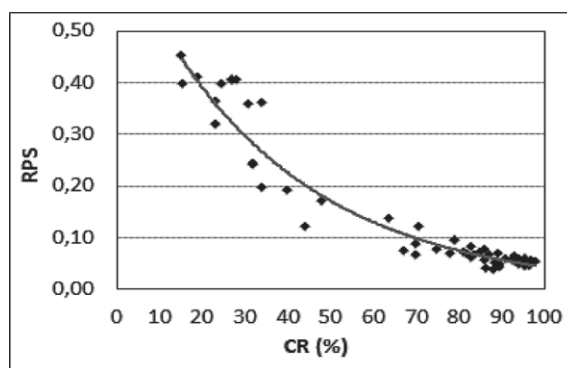


Figura 2. Relación entre los valores de RPS de colza en el PC1 del modelo USLE/ RUSLE y la cobertura por residuos (CR).

La variabilidad de la RPS en PC2 fue explicada por el modelo representado en la ecuación 5 (p valor ≤ 0,05, CME = 0,0024). En esta etapa del cultivo, la CobA participó de manera significativa en el modelo de estimación (p valor ≤ 0,0001), concordando con los reportes internacionales⁽²⁴⁾.

La variabilidad de los valores de RPS en PC3 fue explicada por el modelo representado en la ecuación 6 (p valor ≤ 0,0003; CME = 0,000274; R² Ajustado = 0,79). A diferencia de los PC anteriores, en este período de crecimiento del cultivo la CobA fue la variable que tuvo mayor peso en la variabilidad de la RPS (Cp Mallow 53, 91 y 17 para las variables CR, CobA y CR², respectivamente), que en promedio alcanzó valores de 89 % (cuadro 1). Durante el PC3 se observó a campo que las hojas basales del cultivo fueron senesciendo, contribuyendo en la CR, pero su efecto relativo en este subfactor no fue discriminado, está comprendido dentro del porcentaje general de la medición de CR.

$$RPS_{PC2} = 0,38 - 0,0049CR + 0,000019CR^2 - 0,000018CobA^2 \quad (5)$$

$$RPS_{PC3} = 0,225 - 0,00237CR - 0,00084CobA + 0,00001CR^2 \quad (6)$$

En el análisis conjunto de ambos métodos de cosecha (Figura 3), la variabilidad de los valores de RPS en $PC4_G$ fue explicada por el modelo representado en la ecuación 7 (p valor $\leq 0,05$; CME = 0,001 y $R^2 = 0,73$).

$$RPS_{PC4G} = 0,4221 - 0,0091CR + 0,00005CR^2 \quad (7)$$

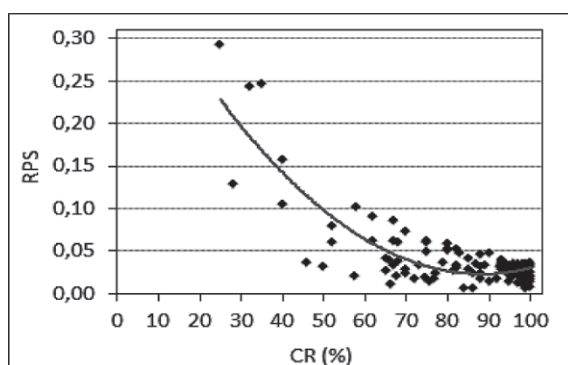


Figura 3. Relación entre los valores de RPS de colza en el $PC4_G$ del modelo USLE/ RUSLE y la cobertura por residuos (CR).

Validación cruzada aleatoria de los modelos de predicción propuestos

Los modelos de estimación de la RPS ajustados para las poblaciones de entrenamiento (ecuaciones 8 a 15) en general mantuvieron los mismos parámetros que las ecuaciones originales (ecuaciones 4, 5 y 7), excepto para el $PC3$ (ecuación 6) donde el ajuste de modelo para Ent_50 por resultado de selección de modelos no incluyó el término CR^2 (ecuación 12).

$$Ent_50 RPS_{PC1} = 0,8518e^{-0,032CR} \quad (8)$$

$$Ent_75 RPS_{PC1} = 0,7353e^{-0,029CR} \quad (9)$$

$$Ent_50 RPS_{PC2} = 0,36 - 0,0047CR + 0,000019CR^2 - 0,000016CobA^2 \quad (10)$$

$$Ent_75 RPS_{PC2} = 0,35 - 0,0043CR + 0,000016CR^2 - 0,000017CobA^2 \quad (11)$$

$$Ent_50 RPS_{PC3} = 0,166 - 0,00105CR - 0,00065CobA \quad (12)$$

$$Ent_75 RPS_{PC3} = 0,190 - 0,00187CR - 0,00069CobA + 0,00001CR^2 \quad (13)$$

$$Ent_50 RPS_{PC4G} = 0,453 - 0,0095CR + 0,00005CR^2 \quad (14)$$

$$Ent_75 RPS_{PC4G} = 0,399 - 0,0086CR + 0,00005CR^2 \quad (15)$$

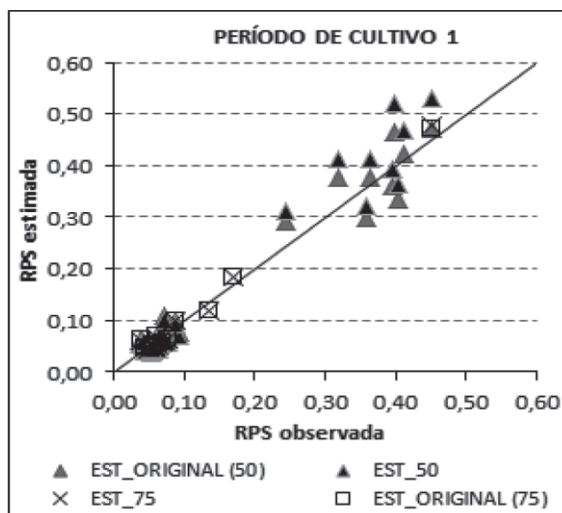


Figura 4. Relación entre los valores de RPS observada y estimada según el modelo original (ecuación 4) y los modelos de entrenamiento (ecuaciones 8 y 9) para el $PC1$ del modelo USLE/ RUSLE.

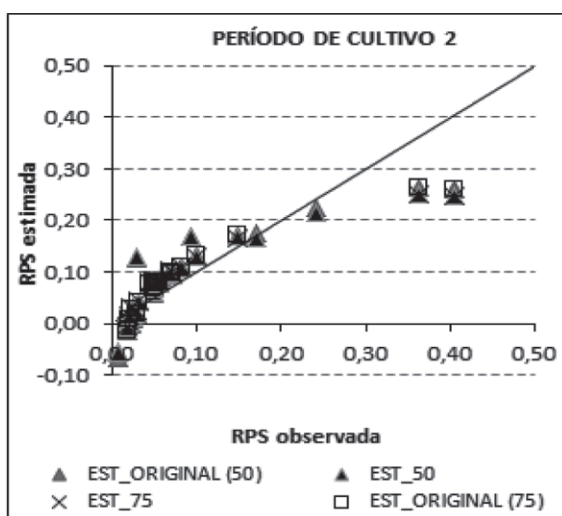


Figura 5. Relación entre los valores de RPS observada y estimada según el modelo original (ecuación 5) y los modelos de entrenamiento (ecuaciones 10 y 11) para el $PC2$ del modelo USLE/ RUSLE.

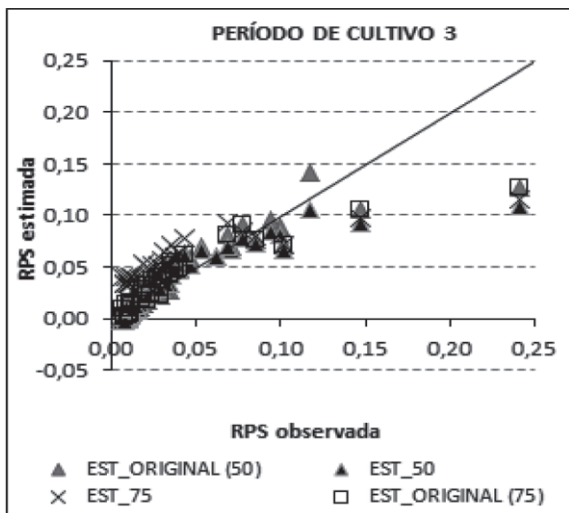


Figura 6. Relación entre los valores de RPS observada y estimada según el modelo original (ecuación 6) y los modelos de entrenamiento (ecuaciones 12 y 13) para el PC3 del modelo USLE/ RUSLE.

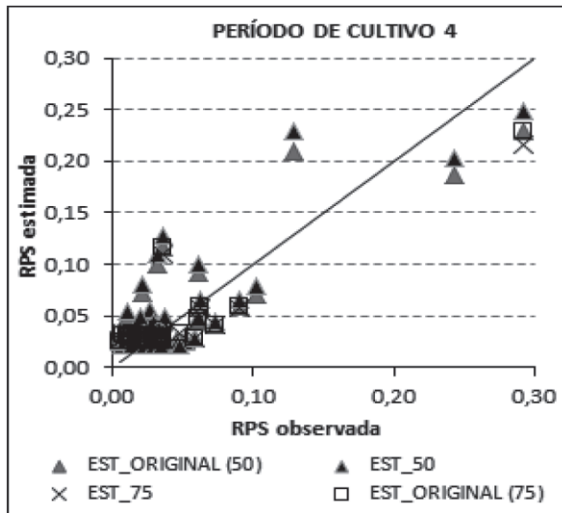


Figura 7. Relación entre los valores de RPS observada y estimada según el modelo original (ecuación 7) y los modelos de entrenamiento (ecuaciones 14 y 15) para el PC4 del modelo USLE/ RUSLE.

Cuadro 2. Indicadores de ajuste de los modelos de predicción sobre la población de prueba (Pru_50 y Pru_75) propuestos para cada período de cultivo (PC).

	PC1		PC2		PC3		PC4	
	Modelo original	Modelo de entrenamiento	Modelo original	Modelo de entrenamiento	Modelo original	Modelo de entrenamiento	Modelo original	Modelo de entrenamiento
Pru_50								
SC	0,024	0,047	0,094	0,099	0,021	0,026	0,042	0,046
n	30		36		63		60	
CME	0,0008	0,0016	0,0026	0,0028	0,0003	0,0004	0,0007	0,0008
RCME	0,0283	0,0398	0,0512	0,0525	0,0181	0,0204	0,0264	0,0278
Promedio RPS estimada	0,157	0,163	0,083	0,081	0,034	0,031	0,046	0,045
Promedio RPS observada	0,153		0,084		0,035		0,042	
RelRCME	18	26	61	63	52	58	63	66
Pru_75								
SC	0,002	0,003	0,041	0,048	0,018	0,037	0,017	0,018
n	15		18		31		30	
CME	0,0001	0,0002	0,0023	0,0026	0,0006	0,0012	0,0006	0,0006
RCME	0,0122	0,0132	0,0478	0,0514	0,0243	0,0347	0,0236	0,0247
Promedio RPS estimada	0,099	0,098	0,094	0,095	0,040	0,056	0,042	0,042
Promedio RPS observada	0,099		0,092		0,041		0,041	
RelRCME	12	13	52	56	59	84	57	60

n: n.º de observaciones; SC: Suma de cuadrados; CME: Cuadrado Medio del Error; RCME: Raíz del CME; RelRCME: Relación entre la RCME y el promedio de RPS observada; PC1, PC2, PC3, PC4: Período de Cultivos.

En general, los resultados de la validación cruzada aleatoria dan valores muy aceptables para el PC 1, observados en la figura 4 y en los valores de ReRCME en el cuadro 2. Sin embargo, para los demás PC los resultados de ajuste de los modelos, según estos dos métodos de verificación, parecen no ser muy buenos, más allá de que la media de RPS de los modelos de predicción propuestos se ajustan bastante al observado (cuadro 2).

Conclusiones

Con los resultados obtenidos en el presente trabajo se pueden estimar los valores de RPS para cada PC del cultivo de colza, basado en las ecuaciones que representa la variación de la RPS en función de la CR y CobA, al momento de estimar el factor C de la USLE/RUSLE, para rotaciones que no excedan la duración del PC4 de colza utilizado en este trabajo. La RPS del PC1 dependió únicamente de la CR, que proviene de los cultivos antecesores, resaltando la importancia de generar altos niveles de rastrojos en cada componente de la rotación para hacer sustentable el sistema en términos de erosión. El análisis de validación de los modelos de estimación propuestos evidencia la sobreestimación del valor de RPS (para rangos inferiores a 0,16, 0,08 y 0,05 de RPS observada en los PC2, PC3 y PC4, respectivamente) para cada PC, excepto PC1, en el que el ajuste es muy bueno. Sumado a esto se encuentra la consideración del factor CA igual a 1 (valor máximo permitido) en la ecuación 2, por lo que quedó incluido en el cálculo de la RPS observada. Por lo tanto, estas características hacen que los valores de RPS aquí propuestos tengan un carácter de mínimo riesgo de erosión en la planificación de uso del suelo en un sistema productivo.

Agradecimientos

A Sebastián Mazzilli, Oswaldo Ernst, Gonzalo Buzoni, Andrés Baeten y Claudio Aquino, por facilitar los sitios experimentales o comerciales y los datos asociados a estos. A Esteban Warren, Sergio Malutin, Gustavo Osta y Gastón Canosa, por el apoyo en los trabajos de campo.

Contribución de autores

OG y FG: diseño de metodología para el levantamiento de la información, revisión de antecedentes bibliográficos, recolección de datos, análisis e interpretación de resultados y redacción.

PM: discusión de la metodología para el levantamiento de la información, revisión, discusión e interpretación de los resultados.

CC: revisión, discusión e interpretación de los resultados.

Bibliografía

1. Pérez-Bidegain M, Hill M, Clerici C, Terra J, Sawchik J, García-Préchac F. Regulatory utilization of USLE/RUSLE erosion rate estimates in Uruguay: A policy coincident with the UN Sustainable Development Goals. In: Rattan L, Rainer H, Takashi K, editors. *Soil and Sustainable Development Goals*. Stuttgart (DE): Catena Soil Sciences; 2018. p. 82-91
2. Hill M, Clérico C. Planes de uso y manejo del suelo. *Revista INIA*. 2011;(26):65-9.
3. República Oriental del Uruguay, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Resolución N° 74 [Internet]. 2013 [cited 2019 Aug 12]. Available from: http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/222_20130207153609265.pdf.
4. Hill M, Clérico C, Mancassola V, Sánchez G. Estimación de pérdidas de suelo por erosión hídrica en tres diferentes sistemas de manejo hortícola del sur de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. 2015;19(1):94-101.
5. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, DIEA (UY). Encuestas Agrícolas «Primavera 2017». Montevideo: MGAP; 2018. 25 p. (Serie encuestas; 349).
6. Wischmeier WH, Smith DD. A Universal Soil Loss Equation to Guide Conservation Farm Planning. In: *International Society of Soil Science, editor. 7th International Congress of Soil Science*; 1960; Madison (WI). Amsterdam: Elsevier; 1961. p. 418-25
7. Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yonder DC. *Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington (DC): USDA; 1997. 384 p.
8. Wischmeier WH, Smith DD. *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation*. Washington (DC): USDA; 1965. 47 p. (Agriculture handbook; 282).
9. Ferreira L, Ferreira S. Cobertura del suelo por rastrojo a la siembra de soja para diferentes secuencias de cultivos [graduate's thesis]. Montevideo (UY): Universidad de la República, Facultad de Agronomía; 2016. 53 p.
10. Varela M, Scianca C, Taboada M, Rubio G. Cover crop effects on soybean residue decomposition and P release in no-tillage systems of Argentina. *Soil Till Res*. 2014;143:59-66.
11. Durán A, García Préchac F. Uso, manejo y conservación de los suelos del Uruguay. In: *Suelos del Uruguay: Origen, clasificación, manejo y conservación*. Vol. 2. Montevideo: Hemisferio Sur; 2007. p. 1-247.
12. Barraclough PB. Root growth, macro nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high yielding winter oilseed rape crop. *Plant Soil*. 1989;119:59-70.

13. White CA, Bradley SR, Berry PM. Root length densities of UK wheat and oilseed rape crops with implications for water capture and yield. *J Exp Bot*. 2015;66(8):2293-303.
14. Chamorro AM, Tamagno N. Producción de materia seca y radical de colza primaveral (*Brassica napus* L.ssp oleífera forma annua). *Rev Fac Agron (La Plata)*. 2004;105(2):53-62.
15. Baillet A. Stades repères du colza [Internet]. 2019 [cited 2019 Aug 12]; [about 1 screen] Available from: https://www.terresinovia.fr/-/les-stades-reperes-du-colza?p_r_p_categoryId=73619&p_r_p_tag=131377&p_r_p_tags=220840.
16. Marcinkvièienē A, Veliēka R, Raudonius S, Kosteckas R. The Relationship between root biomass and productivity of spring oilseed rape (*Brassica napus* L.) as influenced by crop density and fertilization. *Zemdirbyste – Agriculture*. 2013;100(1):39-44.
17. Ēpulienē R, Marcinkvièienē A, Veliēka R, Kosteckas R, Pupalienē R. Effect of spring oilseed rape crop on plant root biomass and soil enzymes activity. *Estonian Journal of Ecology*. 2013;62(1):70-8.
18. Dreceer MF, Schapendonk AHCM, Slafer GA, Rabbinge R. Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilization efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield. *Plant Soil*. 2000;220:189-205.
19. Díaz A, Ortegón AS. Efecto de inoculación con *Azospirillum brasilense* y fertilización química en el crecimiento y rendimiento de canola (*Brassica napus*). *Revista Fitotecnia*. 2006;29(1):63-67.
20. Kuai J, Sun Y, Zuo Q, Huang H, Liao Q, Wu C, Lu J, Wu J, Zhou G. The yield of mechanically harvested rapeseed (*Brassica napus* L.) can be increased by optimum plant density and row spacing. *Scientific Reports* [Internet]. 2015 [cited 2019 Jul 17];5:18835. Available from: <https://www.nature.com/articles/srep18835>.
21. Takashima NE, Rondanini DP, Puhl LE, Miralles DJ. Environmental factors affecting yield variability in spring and winter rapeseed genotypes cultivated in the southeastern Argentine Pampas. *Eur J Agron*. 2013;48:88-100.
22. Mazzilli S, Abbate S, Mendoza Y, Dobreff N, Rosas M, Silchenko S, De Andrea F, Fros D. El rol de *Apis mellifera* en el cultivo de canola (*Brassica napus* L.). *Cangüé*. 2016;37:14-8.
23. López S, Berocay M. Ajuste de la fertilización nitrogenada y azufrada con relación a los indicadores objetivo de suelo y/o planta [grade's thesis]. Montevideo (UY): Universidad de la República, Facultad de Agronomía; 2016. 76 p.
- Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. Washington (DC): USDA; 1978. 58 p. (*Agriculture handbook*; 537).
- Liori F, Sapriza I. Determinación de cobertura del suelo durante el periodo I Modelo Erosión 6.0 para cultivos de soja sembrados luego de distintos antecesores [grade's thesis]. Montevideo (UY): Universidad de la República, Facultad de Agronomía; 2015. 50 p.
- Guo QK, Liu B, Xie Y, Liu Y, Yin Y. Estimation of USLE crop and management factor values for crop rotation in China. *J Integr Agric*. 2015;14(9):1877-88.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes (UY). Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Vol. 3, Clasificación de suelos. Montevideo: MAP; 1976 452 p.
- Hartwig GR, Lafen JM. A meterstick method for measuring crop residue cover. *J Soil Water Conserv*. 1978;32:260-4.
- Stocking MA. Assessing vegetative cover and management effects. In: Lal R, editor. *Soil Erosion: Research Methods*. 2nd ed. New York: Routledge; 1994. p. 163-85.
- Allmaras RR, Burwell RE, Larson WE, Holt RF. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. Washington (DC): USDA; 1966. 22 p. (*Conservation Research Report*; 7).
- García Préchac F. Guía para la toma de decisiones en conservación de suelos. Montevideo: INIA; 1992. 64 p. (*Serie Técnica*; 26).
- Hill M, García Préchac F, Terra J, Sawchik J. Incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo en el modelo USLE/RUSLE para estimar erosión en Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. 2008;12(2):57-67.
- García Préchac F, Terra J, Sawchik J, Pérez M. Mejora de las estimaciones con USLE/RUSLE empleando resultados de parcelas de escurrimiento para considerar el efecto del agua del suelo. *Agrociencia Uruguay*. 2017;21(2):100-4.
- García Préchac F, Hill M, Cléricali C, Hill E. EROSION [Internet]. Version 6.0.20. Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Agronomía; 2009 [cited 5 julio 2019]. Available from: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-de-recursos-naturales/suelos/planes-de-uso-y-manejo-de-suelos/herramientas/programa-erosion>.

Apéndice 1. Coeficientes y estadísticos asociados al modelo original y los modelos de entrenamiento para cada período de cultivo (PC)

<i>PC1</i>			
	Modelo original	Entrenamiento 50 %	Entrenamiento 75 %
<i>Modelo</i>	$a \cdot \text{Exp}(b \cdot \text{CR})$	$a \cdot \text{Exp}(b \cdot \text{CR})$	$a \cdot \text{Exp}(b \cdot \text{CR})$
<i>N</i>	60	30	45
<i>CME</i>	0,0012	0,00145	0,00151
<i>a</i>	0,721	0,8518	0,7353
<i>b</i>	-0,0283	-0,0316	-0,0288
<i>PC2</i>			
	Modelo original	Entrenamiento 50 %	Entrenamiento 75 %
<i>Modelo</i>	$a+b \cdot \text{CR}+c \cdot \text{CR}^2+d \cdot \text{CobA}^2$	$a+b \cdot \text{CR}+c \cdot \text{CR}^2+d \cdot \text{CobA}^2$	$a+b \cdot \text{CR}+c \cdot \text{CR}^2+d \cdot \text{CobA}^2$
<i>N</i>	72	36	54
<i>CME</i>	0,002400	0,0022	0,00248
<i>a</i>	0,38000	0,36208	0,354974
<i>b</i>	-0,00490	-0,00476	-0,004336
<i>c</i>	0,000019	0,000019	0,000016
<i>d</i>	-0,000018	-0,000016	-0,000017
<i>PC3</i>			
	Modelo original	Entrenamiento 50 %	Entrenamiento 75 %
<i>Modelo</i>	$a+b \cdot \text{CobA}+c \cdot \text{CR}+d \cdot \text{CR}^2$	$a+b \cdot \text{CR}+c \cdot \text{CobA}$	$a+b \cdot \text{CobA}+c \cdot \text{CR}+d \cdot \text{CR}^2$
<i>N</i>	126	63	95
<i>CME</i>		0,00028	0,00019
<i>a</i>	0,2225	0,16633	0,19050
<i>b</i>	-0,00084	-0,00105	-0,00069
<i>c</i>	-0,00237	-0,00065	-0,00187
<i>d</i>	0,00001		0,00001
<i>PC4</i>			
	Modelo original	Entrenamiento 50 %	Entrenamiento 75 %
<i>Modelo</i>	$a+b \cdot \text{CR}+c \cdot \text{CR}^2$	$a+b \cdot \text{CR}+c \cdot \text{CR}^2$	$a+b \cdot \text{CR}+c \cdot \text{CR}^2$
<i>N</i>	120	60	90
<i>CME</i>	0,001	0,000282	0,000476
<i>a</i>	0,422	0,45324	0,399157
<i>b</i>	-0,009	-0,00948	-0,008551
<i>c</i>	0,000051	0,00005	0,000049