

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS A SER AJUSTADOS EN WEPP PARA SU  
APLICACIÓN EN URUGUAY

por

Isabel GARCÍA CARRIQUIRY

TESIS presentada como uno de los  
requisitos para obtener el título de  
Magíster en Ciencias Agrarias  
Opción Suelos y Aguas

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
Julio 2017

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. Florencia Alliaume, Ing. Agr. Sebastián Mazzilli, e Ing. Agr. Fernando García Préchac, el 17 de julio de 2017. Autora: Ing. Agr. Isabel García Carriquiry. Director Ing. Agr. Mario Pérez Bidegain.

## AGRADECIMIENTOS

*“Son cosas chiquitas. No acaban con la pobreza, no nos sacan del subdesarrollo, no socializan los medios de producción y de cambio, no expropián las cuevas de Alí Babá. Pero quizá desencadenen la alegría de hacer, y la traduzcan en actos. Y al fin y al cabo, actuar sobre la realidad y cambiarla, aunque sea un poquito, es la única manera de probar que la realidad es transformable”*

*E. Galeano*

Me gustaría agradecer a

Mis padres por los valores transmitidos, y por acompañarme en cada paso de este largo camino.

Mis hermanos: Ignacio y familia por permitirme ser parte de su hogar y sentirme como en casa en todo momento, Santiago y familia por ser mi visita obligada y alegría en las idas a Montevideo, y Guzmán y familia por su cariño, escucha y siempre tener una palabra de aliento.

Mis amigas por soportar mis desánimos y ausencias.

Amigas que me dio la FAGRO “generación EEMAC 2010” que estuvieron pendientes de este proceso, dando palabras de aliento constantemente.

La familia del “Sapo” por ser mi contención en lo cotidiano.

Equipo de Suelos y Aguas, en especial a Mario Pérez, por recibirme y con sus aportes siempre constructivos contribuir a mi formación.

Los docentes Oswaldo Ernst, Jorge Franco y Sebastián Mazzilli, que con su crítica enriquecieron este trabajo.

Sociedad de Fomento Rural Colonia Suiza por el apoyo que me permitió formarme a la par en lo académico y profesional.

Mi equipo de trabajo “Polo Holístico” por su paciencia.

ANII por la financiación.

A todos aquellos que contribuyeron a la realización de este trabajo,

MUCHAS GRACIAS!

## TABLA DE CONTENIDO

Página

PÁGINA DE APROBACIÓN .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.1. IMPORTANCIA DE LA EROSIÓN Y SU EFECTO EN LA PRODUCTIVIDAD DEL SUELO Y CALIDAD DEL AGUA.....	1
1.2. IMPORTANCIA DE LA ESCALA TEMPORAL EN LA ESTIMACIÓN DE EROSIÓN .....	2
1.3. EMPLEO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS EN EL MUNDO Y URUGUAY.....	4
1.4. MODELO ALTERNATIVO: WATER EROSION PREDICTION PROJECT (WEPP) ....	7
1.5. LIMITANTES EN URUGUAY PARA TRABAJAR CON ESTOS MODELOS .....	10
1.6. JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DE LAS VARIABLES.....	10
1.7. LIMITANTES GENERALES DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE EROSIÓN .....	13
1.8. OBJETIVOS.....	14
2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	16
2.1. COMPARACIÓN DE WEPP Y USLE EN DIVERSOS ESCENARIOS.....	16
2.1.1. <u>Elaboración de inputs para WEPP</u> .....	16
2.1.1.1. Generación de los archivos climáticos .....	16
2.1.1.2. Suelo.....	20
2.1.1.3. Rotaciones de cultivos .....	21
2.1.2. <u>Elaboración de insumos para USLE</u> .....	22
2.2. COMPARACIÓN ENTRE USLE Y WEPP EN COLONIA Y TREINTA Y TRES.....	22
2.3. SIMULACIÓN DE CULTIVOS CON WEPP .....	24
2.3.1. <u>Ajuste de parámetros de crecimiento de soja</u> .....	24
2.3.2. <u>Datos experimentales de escurrimiento</u> .....	26
3. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	27
3.1. ESTIMACIONES DE EROSIÓN HÍDRICA CON USLE Y WEPP.....	27

3.1.1.	<u>Creación de las bases de datos climáticas</u> .....	27
3.1.2.	<u>Estimación de erosión con WEPP y Erosión 6.0</u> .....	28
3.2.	ESTIMACIONES DE EROSIÓN EN DOS SUELOS CONTRASTANTES DEL PAÍS.....	31
3.3.	EFFECTO DE LA MODELACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL CULTIVO SOBRE EL ESCURRIMIENTO Y LA EROSIÓN .....	34
3.3.1.	<u>Ajuste de los parámetros de crecimiento del cultivo</u> .....	34
3.3.2.	<u>Impacto del ajuste sobre la estimación de erosión</u> .....	36
3.3.3.	<u>Análisis de las estimaciones de WEPP durante el cultivo</u> .....	41
3.3.4.	<u>Análisis de las estimaciones de WEPP en el barbecho</u> .....	44
4.	<u>CONCLUSIONES</u> .....	47
5.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	49
6.	<u>ANEXOS</u> .....	57
6.1.	AJUSTE DE PARÁMETROS DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE SOJA EN WEPP .....	57
6.1.1.	<u>Resumen</u> .....	57
6.1.2.	<u>Summary</u> .....	58
6.1.3.	<u>Introducción</u> .....	59
6.1.4.	<u>Materiales y métodos</u> .....	61
6.1.5.	<u>Resultados y discusión</u> .....	63
6.1.6.	<u>Conclusiones</u> .....	67
6.1.7.	<u>Bibliografía</u> .....	67
6.2.	EXTENSIÓN Y ORIGEN DE LOS REGISTROS CLIMÁTICOS.....	69
6.3.	FACTOR C DE LAS ROTACIONES UTILIZADAS EN EROSIÓN 6.0 .....	70
6.4.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO .....	70
6.5.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS .....	71

## RESUMEN

El modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP), puede predecir pérdidas de suelo distribuidas en el espacio y tiempo, y presenta un rango amplio de aplicabilidad, por lo tanto permitiría generar medidas efectivas de conservación de suelos si se ajustan determinados parámetros a nivel local. Los objetivos planteados fueron: a) comparar las estimaciones de erosión en sistemas agrícolas probables en distintas zonas del Uruguay utilizando la Universal Soil Loss Equation (USLE) y WEPP, b) compararlos en sitios donde el esfuerzo cortante crítico y la conductividad hidráulica efectiva en WEPP fueron ajustados previamente, y c) evaluar el ajuste de los parámetros de crecimiento de un cultivo en la estimación de escurrimiento y erosión con WEPP. Para el primero, se simularon 11 escenarios diferentes con ambos modelos. Los suelos en que WEPP fue ajustado son: Argisol subéutrico de la unidad Alférez (Treinta y Tres) y Brunosol éutrico de la unidad Ecilda Paullier-Las Brujas (Colonia). Por último, se contrastó el sistema soja continua simulado en Colonia, con uno al que se modificaron los parámetros de crecimiento del cultivo conocidos por su ajuste local con CropSyst, y esta con el escurrimiento medido en 4 años. Ambos modelos generaron estimaciones de erosión distintas y las jerarquizaron de manera diferente. En Treinta y Tres, USLE estimó una pérdida  $27 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  mayor que WEPP, adjudicada a un factor C 4 veces superior. En Colonia WEPP consideró al suelo más erodable, pero estimó un factor C menor que USLE, arrojando estimaciones similares. Ajustados los parámetros de crecimiento, se redujo la diferencia en tiempo a madurez fisiológica en un 59% y en un 39% en el máximo de biomasa alcanzado (excepto en años de deficiencias hídricas) respecto a lo simulado con CropSyst. Aun así, WEPP sobreestimó escurrimiento, y sobreestimaría la cobertura en invierno. Resulta imprescindible para su aplicación en el país continuar ajustando parámetros de suelos, simulación de crecimiento de cultivos y descomposición de rastrojos.

**Palabras clave:** modelación, sedimentación, degradación de suelos.

## PARAMETERS IDENTIFICATION TO BE ADJUSTED IN WEPP FOR ITS APPLICATION IN URUGUAY

### SUMMARY

The Water Erosion Prediction Project (WEPP) model can predict soil losses with spatial and temporal distribution, having a wide range of applicability, thus, if certain parameters are adjusted locally, it will allow the development of effective soil conservation measurements. The aim of this work was: a) to compare erosion estimations of probable systems in different areas of Uruguay using Universal Soil Loss Equation (USLE) and WEPP, b) to compare them in sites where critical shear and effective hydraulic conductivity in WEPP were previously adjusted, c) to evaluate the impact of crop growth parameters adjustment on WEPP runoff and erosion estimations. At first, 11 different scenarios were simulated with both models. Soils where WEPP was adjusted were: Argisol subeutrico from Alférez unit (Treinta y Tres) and Brunosol éutrico from Ecilda Paullier-Las Brujas unit (Colonia). Finally, the simulated continuous soybean system was tested in Colonia, with one that modified the crop growth parameters known for its local adjustment with CropSyst, and with the runoff measured during 4 years. Both models generated different erosion estimations and hierarchized them differently. In Treinta y Tres, USLE estimated a loss  $27 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  greater than WEPP, awarded a C factor 4 times higher. In Colonia, WEPP considered the soil more erodable, but estimated a lower C factor than USLE, yielding similar estimates. Once adjusted crop growth parameters, time to physiological maturity was reduced by 59% and biomass maximum reached by 39% (except in water deficit years) compared to that simulated with CropSyst. Even so, WEPP overestimated runoff, and overestimated winter coverage. It is essential for its application in the country to continue adjusting parameters of soils, simulation of crop growth and decomposition of stubble.

**Keywords:** modeling, sedimentation, soil degradation.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. IMPORTANCIA DE LA EROSIÓN Y SU EFECTO EN LA PRODUCTIVIDAD DEL SUELO Y CALIDAD DEL AGUA

La calidad de suelos fue, es y seguirá siendo una de las mayores preocupaciones a nivel mundial y local. La conciencia sobre la necesidad de la conservación del suelo ha dependido de la situación natural y sociocultural, siendo diferente para cada época y cultura (Dotterweich, 2013). La clave para producir suficiente alimento para los 11 billones de personas proyectadas al 2100, será encontrar mejores maneras de manejar las tierras agrícolas que ya tenemos (actualmente son el 40% de la superficie terrestre), en lugar de expandirse a nuevas áreas de escaso potencial productivo según (Amundson *et al.*, 2015). En un reporte técnico elaborado por la Soil and Water Conservation Society (SWCS) de los Estados Unidos en 2003 (Berc *et al.*, 2003), sobre el cambio climático y su impacto en la erosión de suelos y el escurrimiento en tierras agrícolas, se concluyó que un cambio en el régimen de precipitaciones como consecuencia del cambio climático, llevaría a un cambio en el nivel de riesgo al que se exponen las tierras agrícolas. En general, un régimen de mayores precipitaciones, particularmente si la intensidad de las tormentas se incrementa más que su frecuencia, genera un aumento del riesgo de erosión, del escurrimiento, y de daños ambientales y ecológicos. A su vez este riesgo aumenta generalmente a mayor proporción que el volumen de precipitaciones o su intensidad (Berc *et al.*, 2003).

A nivel nacional, la importancia de mantener la productividad del suelo radica en que más del 70% del valor total de las exportaciones de Uruguay provienen del sector agroindustrial (Uruguay XXI, 2016). El país cuenta con una importante área capaz de generar producción agropecuaria (17 millones de hectáreas), aunque el área potencial para cultivos no supera el 25%. El 87% del área con mayor potencial agrícola del Uruguay ha sufrido algún grado de erosión y degradación (INIA, 2015). Siendo la erosión hídrica de origen antrópico, el principal problema asociado a la producción



agropecuaria (Hill *et al.*, 2015; Sawchik *et al.*, 2015). Por otra parte, los sedimentos originados en la erosión de los suelos, son el principal contaminante de aguas superficiales (García Préchac, 2013).

Sin embargo, un cambio en el uso del suelo puede ser más determinante en que la erosión del suelo se torne más extensa y severa (Evans *et al.*, 2015).

En este marco es que se generan los esfuerzos por conservar una calidad de suelos que permita al menos mantener la productividad del mismo a lo largo de las generaciones. La erosión hídrica es un aspecto clave a controlar si se quiere mantener la calidad de suelos y de los cursos de agua, situación que actualmente podría verse agravada por el cambio climático.

## 1.2. IMPORTANCIA DE LA ESCALA TEMPORAL EN LA ESTIMACIÓN DE EROSIÓN

El proceso de erosión se compone por las etapas desagregación, transporte y deposición (Foster *et al.*, 1985). La desagregación producto del golpeteo de las gotas de lluvia y su energía cinética, provoca en parte la ruptura de las uniones de las partículas que conforman los agregados, y la restante se disipa en salpicado, lo que da inicio al proceso de transporte. La energía cinética del agua de escurrimiento también es capaz de producir la desagregación del suelo con el que se encuentra directamente en rozamiento, así como también se disipará esta energía en el transporte de sedimentos. La energía de escurrimiento puede ser menor a la requerida para transportar los sedimentos produciéndose sedimentación, consecuencia de una disminución de la pendiente del terreno, y por ende su velocidad, o un aumento de la carga de sedimentos reduciendo su energía para el transporte.

La erosión hídrica se puede clasificar en laminar o no encauzada (interrill erosion) y en encauzada (rill erosion). La primera ocurre cuando se desprende una capa cuasi uniforme del suelo en toda su superficie, es decir que las partículas desprendidas en el agua de escurrimiento han corrido uniformemente por el terreno

sin concentrarse en ningún lugar. Por el contrario la erosión encauzada se debe a que el escurrimiento se concentra generando mayor energía con mayor capacidad de desprendimiento y formación de canalículos que podrán o no derivar en canales o cárcavas (Toy *et al.*, 2002).

Como se describe en este proceso, el riesgo de pérdida de suelo por erosión hídrica está ligado al régimen de precipitaciones. Debido a que las mismas ocurren de manera concentrada, en un corto período de tiempo, la mayoría del proceso erosivo, ocurre en intervalos muy cortos, como pueden ser unos pocos eventos (Edwards y Owens, 1991). El estudio en parcelas de escurrimiento, junto con otros, han brindado evidencia considerable sobre el efecto que las tormentas individuales generan en la estimación de erosión de largo plazo (Furl *et al.*, 2015). Smith *et al.* (1945) reportan que en un estudio de 10 años, las 11 tormentas más intensas produjeron 23% del escurrimiento y 36% de la pérdida de suelo de una parcela bajo maíz continuo, para dicho período. Nearing *et al.* (2007) realizaron un estudio en 7 cuencas, y reportaron que en 6 cuencas de pastizales del sur de Arizona, 6 a 10 eventos erosivos produjeron el 50 % del total de sedimentos erosionados en un período de 11 años. En una séptima cuenca estudiada, se registró que dos tormentas produjeron 66% del total de suelo erosionado. Edwards y Owens (1991) reportan que en nueve cuencas pequeñas (1 hectárea) cultivadas en el North Appalachian Agriculture Research Station, cinco eventos produjeron al menos 66% del total de suelo perdido de cada una de ellas durante 28 años.

La escala temporal en la cual se analiza el proceso de erosión depende los objetivos del trabajo, y por ende las herramientas que pueden dar respuestas acorde (Stroosnijder, 2005). Existen dos escalas temporales importantes en la erosión: el evento de precipitación para el diseño de tecnologías de control de la erosión, y el promedio anual para la planificación de la conservación. Si los eventos extremos son de hecho la fuerza dominante detrás de las estimaciones de erosión de largo plazo a nivel de ladera y cuenca, es necesario su reconocimiento en modelos de estimación de erosión para llegar a conclusiones razonables (Furl *et al.*, 2015). Por lo que, de

lograrse su monitoreo en el tiempo, es probable que se logre explicar la mayor parte de la erosión (Boardman, 2006). Bagarello *et al.* (2013) y Evans *et al.* (2015) coinciden con estos conceptos y sugieren que el diseño de la conservación de suelo y las opciones de mitigación de escurrimiento y erosión, deberían desarrollarse teniendo en cuenta eventos erosivos con determinada frecuencia o período de retorno. En esta misma línea, en el reporte de SWCS de 2003 se sugiere reevaluar el enfoque del plan de conservación de suelos basado en el promedio de precipitación anual, dado que el régimen de precipitaciones actual y las predicciones de cambio climático, se caracterizan por el aumento de la frecuencia de eventos extremos. Proponen identificar umbrales de erosión de suelos, escurrimiento o transporte de contaminantes cuyo daño en determinada frecuencia resulta inaceptable; identificar el momento crítico en el año en el que el ciclo agrícola presenta mayor riesgo de daño; determinar la probabilidad de ocurrencia de tormentas de suficiente intensidad como para causar daños que excedan los umbrales establecidos; y diseñar sistemas de conservación que sean protectores en momentos de elevada vulnerabilidad y durante eventos particulares.

### **1.3. EMPLEO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS EN EL MUNDO Y URUGUAY**

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE, (Wischmeier y Smith, 1978)) y sus derivadas RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard *et al.*, 1997), MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) (Williams, 1975) son los modelos empíricos a nivel mundial más empleados (Furl *et al.*, 2015).

El modelo USLE fue diseñado como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones sobre el manejo de tierras en agricultura, para proveer lineamientos específicos y confiables para la selección de prácticas de conservación de suelos y aguas a nivel de campo (Wischmeier y Smith, 1978). Creado y mayormente utilizado

para estimar erosión promedio de largos períodos de tiempo, ignorando la contribución que hacen los eventos individuales (Boardman, 2006).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) tiene la siguiente forma

$$A = R.K.L.S.C.P \quad [1]$$

Donde A es el promedio anual de pérdida de suelo (masa  $\text{área}^{-1} \text{año}^{-1}$ ) en el largo plazo (más de 20 años), "R" es el factor erosividad de la lluvia, "K" es el factor erodabilidad del suelo (pérdida de suelo por unidad de R), "L" y "S" son los factores largo e inclinación de la pendiente, "C" es el factor uso y manejo de suelos y "P" es el factor prácticas mecánicas de apoyo.

En Uruguay se ha validado el modelo empírico Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Wischmeier y Smith, 1978) y su versión revisada, RUSLE (Renard *et al.*, 1997), la cual estima pérdidas medias de suelo por erosión no encauzada por unidad de superficie y año para períodos largos de tiempo (Durán y García Préchac, 2007). Adicionalmente, la normativa legal actual (ley número 15.239 y sus decretos reglamentarios) referida a conservación de suelos incorpora a la USLE/RUSLE como la herramienta idónea para estimar la erosión de las rotaciones agrícolas y sistemas de producción lecheros. La erosión estimada para un uso y manejo determinado debe ser menor o igual al valor de máxima pérdida suelo tolerable (valor T) del suelo en cuestión.

El valor T es un concepto originado en USA a principio de 1940 (Smith *et al.*, 1945; Schmidt *et al.*, 1982). Se define como la máxima tasa de erosión anual que permite una elevada productividad de los cultivos económica e indefinidamente (Schmidt *et al.*, 1982). Dicho concepto está basado en la premisa de que el suelo se regenera a partir de la meteorización del material parental y por deposición eólica o fluvial de material, y que esta tasa de renovación puede ser estimada (Schmidt *et al.*, 1982). Sin embargo, existen muy pocas medidas directas de tasas de formación de suelo y su determinación es complicada. Li *et al.* (2009) citaron un rango de formación de suelo que oscila entre 0,31 y 0,108 (promedio 0,058)  $\text{mm año}^{-1}$  en una escala global (Wakatsuki y Rasyidin, 1992). Verheijen *et al.* (2009) citan valores para condiciones

actuales en Europa entre  $0,3 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  y  $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ , en Australia semi-árida las tasas de  $0,004 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  (Pillans, 1997) y para una cuenca bien drenada y de altas precipitaciones del suroeste de Japón, en torno a  $5,7 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  (Wakatsuki y Rasyidin, 1992). Por otra parte suelos litológicos como los regosoles de China, desarrollados a partir de roca sedimentaria tienen una tasa de meteorización de  $1 \text{ mm año}^{-1}$  a una profundidad de 60 cm, mucho más elevada que la tasa de formación de otros suelos (Li *et al.*, 2009). Mientras que Logan (1977) sostiene que gran parte de las estimaciones de renovación de suelos son de  $0,5 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ . La gama de tasas de erosión de los suelos arables reportados es muchas veces mayores que el rango de velocidades de formación de suelos reportados, lo que puede deberse a que la formación del suelo se ve afectado poco por las actividades humanas, mientras que hoy la erosión del suelo en su mayoría es inducida por factores antrópicos (Verheijen *et al.*, 2009). Una tasa de renovación de  $1,1 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  se cree que es un promedio útil para materiales no consolidados según EEA (1998) citado por Bazzoffi (2009), para la mayoría de las rocas consolidadas los valores son mucho menores, este valor aseguraría un espesor constante, pero sería extremadamente difícil, sino imposible, limitar la erosión a este valor en la práctica.

El valor de T de los suelos de Uruguay fue establecido con los mismos criterios que para los suelos de Estados Unidos (Puentes, 1981), presentados a continuación:

- 1) “La pérdida de suelo debería reducirse al nivel que mantenga una adecuada profundidad de suelo favorable a la producción de cultivos durante un largo período de tiempo.”
- 2) “La pérdida de suelo debería mantenerse por debajo de aquella que cause la formación de cárcavas en el campo o cause grave sedimentación en cursos de agua, cunetas de carreteras, etc.”
- 3) “La pérdida de nutrientes por escurrimiento no debería ser excesiva.”

Los suelos de Uruguay tienen su horizonte arcilloso en general a los 10 a 50 cm desde la superficie, por lo que en su mayoría les fue designado un valor de T de 7 Mg

ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> (Puentes, 1981). En general los valores de T oscilan entre 2 y 11 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> (Schmidt *et al.*, 1982). En los últimos tiempos se ha retomado la discusión sobre el valor de “T”, ya que se cree que no provee adecuada protección a la degradación del recurso suelo por ser excesivo (Mann *et al.* (2002) y Lal (1998) citados por Newman *et al.* (2010)). Nearing (2002) afirma que “la evidencia científica que lo soporta es pobre, obsoleta y ambigua, y que los factores económicos, ambientales y sociales han cambiado”. Así es que algunos autores han realizado diversas propuestas alternativas, por ejemplo Bazzoffi (2009) sugirió la utilización de un índice que contemple la probabilidad de que ocurra un evento de elevada intensidad de erosión de suelo en un determinado período (frecuencia), la “vulnerabilidad” o capacidad inherente del suelo a tolerar la erosión (en Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>) y la capacidad de los componentes fuera de sitio de absorber o tolerar un excesivo ingreso de sedimentos provenientes de la erosión de suelos. Li *et al.* (2009) proponen tener en cuenta 3 criterios para generar el valor T: cantidad de pérdida de suelo igualada a la tasa de formación de suelo (factor más importante en la determinación del valor de T para cualquier suelo); la máxima pérdida de suelo que no permite reducción de la productividad, en términos económicos, por un largo periodo de tiempo; y la máxima cantidad de pérdida de suelo que no causará el deterioro de los ambientes suelo y agua, en y fuera del sitio.

#### 1.4. MODELO ALTERNATIVO: WATER EROSION PREDICTION PROJECT (WEPP)

A partir del último tercio del siglo pasado se han realizado esfuerzos enfocados en el desarrollo de modelos basados en procesos, quienes utilizan ecuaciones físicas para describir los procesos que ocurren en superficie y las rutinas de sedimentación (Furl *et al.*, 2015). En 1985, el USDA inició el Water Erosion Prediction Project (WEPP) para “desarrollar una nueva generación de tecnología de estimación de la erosión hídrica...” (Nearing *et al.*, 1989). Este es un modelo de simulación continua, que predice pérdida de suelo y su deposición en lugar de pérdida de suelo promedio neta.

WEPP (Nearing *et al.*, 1989) estima el desprendimiento de suelo producido por el impacto de las gotas de lluvia, escurrimiento superficial, y encauzado, utilizando las descripciones físicas de la teoría de desprendimiento. El modelo también se nutre de sofisticadas descripciones climáticas, hidrológicas, crecimiento de cultivos, y manejo de la tierra.

Esto le confiere ciertas ventajas: tiene la capacidad de predecir pérdidas de suelo con distribución espacial y temporal, presenta un rango mayor de aplicabilidad, provee de estimaciones que explicitan donde y cuando se produce la erosión y por lo tanto permite generar medidas más efectivas de conservación de suelos (Tiwari *et al.*, 2000), pudiendo generar información referente al riesgo de erosión que complementa al valor de "T" tradicional. Es precisamente un modelo, que por su capacidad de evaluación temporal (estimaciones de paso diario) permite más que la obtención de un valor único anual, logrando identificar y evaluar los períodos críticos en la evaluación de desempeño ambiental de la gestión de tierras agrícolas (Huffman *et al.*, 2015).

Como la mayoría de los modelos basados en procesos, el componente de erosión de WEPP está basada en una ecuación de continuidad en estado estacionario:

$$\frac{dG}{dx} = Df + Di \quad [2]$$

Donde "dG" es la carga de sedimentos, "x" es la distancia pendiente abajo, "Di" es la tasa de erosión interril y "Df" es la tasa de erosión en canalículos (rill). Se considera que "Di" es independiente de la distancia, por lo que la erosión entre canalículos (interill) se produce a tasa constante a lo largo de la pendiente. "Df" es positiva cuando se produce desprendimiento y negativa cuando se produce deposición. Cada uno de estos parámetros se calcula en función de cada área de surcos.

Lafren *et al.* (2004) sostienen que este tipo de modelos presenta un mayor rango de aplicabilidad en base a los resultados obtenidos con WEPP y su comparación con aquellos obtenidos por USLE y RUSLE. Además, debido a que WEPP se basa en procesos, puede ser extrapolado a una gama más amplia de condiciones que pueden ser imprácticas o antieconómico para la prueba de campo (Flanagan y Nearing, 1995).

Sin embargo existe bibliografía que recomienda realizar el ajuste de ciertos parámetros de este modelo para mejorar las estimaciones de pérdida de suelo (Tiwari *et al.*, 2000; Jorge, 2012). Los análisis de sensibilidad de este modelo coinciden en que los parámetros de precipitaciones (cantidad, duración e intensidad) y de infiltración (cobertura del suelo y conductividad hidráulica) fueron los más influyentes en estimar el escurrimiento, así como las características hidrológicas generadas, la cobertura del suelo y los parámetros de erodabilidad fueron los más influyentes sobre las estimaciones de erosión (Tiwari *et al.*, 2000). Gonçalves (2007) entre otros, recomiendan identificar y medir los parámetros sensibles del modelo en condiciones locales para mejorar las estimaciones del modelo en cuestión.

Amorim *et al.* (2010) compararon el desempeño de los modelos USLE, RUSLE y WEPP en Brasil, y ninguno fue el mejor estimador de la erosión real para todas las condiciones de uso y manejo analizadas, siendo WEPP más preciso en un 45,5% de las estimaciones, RUSLE en un 42,4% y USLE en un 12,1% de las condiciones simuladas. En general WEPP presentó estimaciones más precisas que los otros dos modelos cuando se compararon los parámetros de evaluación estadística. Esto se contrapone con los resultados obtenidos por Tiwari *et al.* (2000), lo que podría estar asociado a la amplia base de datos con que cuenta Estados Unidos, para la aplicación de USLE y RUSLE, así como el hecho de que se trata de modelos empíricos que se han desarrollado para el suelo y las condiciones climáticas de dicho país. Esta hipótesis se alinea a la idea que los modelos empíricos cuando son utilizados en los lugares donde fueron desarrollados pueden ser más precisos que modelos de mayor complejidad.

En Uruguay, existen escasos antecedentes de uso de WEPP para estimar erosión. Jorge (2012) realizó un ajuste de los parámetros base de la conductividad hidráulica y del esfuerzo cortante crítico en dos sitios, con lo que obtuvo valores de escurrimiento medio anual y erosión anual media más cercanos a los medidos y a los resultados de erosión arrojados por USLE/RUSLE.



## 1.5. LIMITANTES EN URUGUAY PARA TRABAJAR CON ESTOS MODELOS

Una de las principales limitaciones para el uso de los modelos basados en procesos es la dificultad en la parametrización. Aunque parametrizar el modelo USLE no es sencillo si se desean obtener buenos resultados en muchas ubicaciones geográficas, los modelos basados en procesos requieren un esfuerzo considerable para obtener valores apropiados de los parámetros para poder emplearlos con confianza. Esto sumado a su incapacidad de lograr mejores resultados en la estimación de pérdidas de suelo por erosión en el largo plazo que utilizando USLE/RUSLE (Bhuyan *et al.* (2002), Aksoy y Kavvas (2005), citados por Furl *et al.* (2015) y Tiwari *et al.* (2000)), motiva al uso del modelo USLE/RUSLE en situaciones para las cuales no fue diseñado (Kinnell, 2010).

Más allá de los trabajos de ajuste y validación llevados a cabo en Uruguay con el modelo USLE/RUSLE, la base de datos experimental con la que se cuenta para ajustar y validar otros modelos es reducida. Por lo tanto trabajar con modelos más complejos como lo es Revised USLE Versión 2 (RUSLE2) o WEPP implica aumentar la base experimental por un lado y/o estudiar el impacto de variables claves en las estimaciones. Por otra parte, una alternativa es estudiar cómo variables claves ajustadas para otros modelos en Uruguay afectan las estimaciones de erosión en WEPP.

## 1.6. JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DE LAS VARIABLES

Laflen *et al.* (2004) afirman que el crecimiento de plantas y la generación de residuos y su destino, deben ser modelados razonablemente si se quieren obtener buenos resultados. Flanagan *et al.* (2012) sugieren para simulaciones continuas con el modelo WEPP tomar el cultivo de la base de datos predeterminada que más se asemeja al que se quiere reproducir, sobre esta realizar los cambios acordes a la

información que se tiene, y verificar con las salidas del modelo las curvas de crecimiento del cultivo y degradación de residuos. En este marco se enfocó el trabajo con WEPP principalmente sobre las variables del cultivo de soja (cultivo de mayor importancia económica de nuestro país) que demuestran tener más impacto sobre la pérdida de suelo por erosión, ya sea por la sensibilidad del parámetro, como por la magnitud del cambio y aquellas sobre las cuales existe información local que permita modificarlo. Las variables de crecimiento del cultivo de mayor impacto sobre el total de erosión promedio anual son la temperatura base del aire diaria ( $^{\circ}\text{C}$ ), coeficiente de cobertura del rastrojo aplanado, la relación biomasa/energía ( $\text{BE}$ ,  $\text{kg MJ}^{-1}$ ), suma térmica en la estación de crecimiento ( $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ ) y la temperatura óptima de crecimiento ( $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ ) (Arnold *et al.*, 1995). Estas variables no solo afectan la erosión promedio anual, sino que impactan sobre los momentos en que esta se produce, siendo justamente la determinación de “el momento” en que se generan los picos de erosión una de las ventajas atribuidas a este modelo.

La temperatura base, es la temperatura mínima diaria del aire, específica de la especie, necesaria para el crecimiento de la planta, expresada en grados Celsius o Fahrenheit.

La relación biomasa/energía es sugerida por el mismo modelo como la variable más importante a ajustar para cambiar tasa y cantidad de biomasa acumulada. Permite calcular la tasa de crecimiento potencial de una planta por unidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada ( $\text{kg MJ}^{-1}$  o  $\text{lb Langley}^{-1}$ ), como se muestra en la ecuación [3].

$$\Delta B_{p,i} = 0.0001 BE_j (PAR)_i$$

[3]

Donde “ $\Delta B_{p,i}$ ” es el incremento potencial del total de biomasa en el día  $i$  ( $\text{kg.m}^{-2}$ ), “ $BE_j$ ” es el parámetro del cultivo utilizado para convertir energía en biomasa del cultivo  $j$  ( $\text{kg.MJ}^{-1}$ ), y “ $PAR$ ” es radiación fotosintéticamente activa ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )

Este potencial de incremento de biomasa del cultivo por día se ajusta diariamente de acuerdo a las restricciones al crecimiento.

La Suma Térmica en la estación de crecimiento es el número de grados día que requiere una planta anual para alcanzar la madurez y detener su crecimiento (acumulación de biomasa viva).

El coeficiente de cobertura del rastrojo aplanado, medido como metros cuadrados por kilo de rastrojo, convierte la masa de rastrojo en porcentaje de cobertura del suelo. Stott (1991) sostiene que uno de los problemas más importantes con ciertos modelos de predicción de cobertura de suelo es el supuesto de que la densidad de rastrojos de un cultivo se mantiene constante, por lo tanto, la relación cobertura por residuos y masa de residuos permanece igual a través del tiempo. Existe información que demuestra lo contrario, es por ello que se considera una variable de interés para este estudio. Gregory (1982) desarrolló una ecuación en la que relaciona el porcentaje de suelo cubierto por rastrojo y su masa seca en superficie:

$$Fc = 1 - e^{-AmM} \quad [4]$$

Donde "Fc" es la fracción de suelo cubierto por residuos, "Am" es área que abarca una unidad de masa (por ejemplo  $m^2 \text{ kg}^{-1}$  de rastrojo) y "M" es la masa total de rastrojo. El valor de Am estimado por Sloeneker et al (1977) citados por Gregory (1982) para soja fue de  $0,00072 \text{ ha kg}^{-1}$ . El valor de Am también fue determinado por medición directa para soja en distintos años, situaciones (rotaciones y sistemas de laboreo) y lugares, así como para diferentes partes de la planta. Los valores medidos oscilaron en promedio entre  $0,00032$  y  $0,00048 \text{ ha kg}^{-1}$ , desde 1979 a 1981. Estos valores son un promedio ponderado de la cantidad de hojas y el área que ocupan por kg, y la cantidad de tallos y el área que ocupan por kg. El porcentaje de hojas en el rastrojo osciló entre 34 y 63%. Los valores de Am para la fracción hojas osciló entre  $0,00047$  y  $0,00086 \text{ ha kg}^{-1}$ , para la fracción tallos osciló entre  $0,00017$  y  $0,00027 \text{ ha kg}^{-1}$ . Al Sudeste de Missouri, en un sistema sin laboreo el valor promedio en rastrojo de soja fue  $0,00021 \text{ ha kg}^{-1}$ . Gregory (1982) concluye que el rastrojo de soja parece ser más difícil de caracterizar que el de maíz, girasol, algodón y trigo. Ninguno de los coeficientes medidos en residuos de soja a cosecha con medidor de área foliar fue tan grande como  $0,00072 \text{ ha kg}^{-1}$  obtenido por Sloneker y Moldenhauer (1977).

Cuando se compararon las predicciones de la ecuación [4], con las coberturas a campo de la soja, las predicciones no fueron tan satisfactorias como para otros cultivos. Cuando se utilizaron los valores medidos de  $A_m$ , las predicciones siempre subestimaron las medidas de cobertura, esto se adjudicó a que el área que ocupan las hojas secas es menor que las hojas verdes, y su rápida degradación, por lo que a cosecha se logra medir menos área cubierta por hojas. Bajo esta hipótesis se empleó el coeficiente obtenido por Sloneker y Moldenhauer (1977),  $0,00072 \text{ ha kg}^{-1}$  de rastrojo de soja, y las predicciones resultaron más cercanas a los valores medidos. Sin embargo, en mediciones posteriores, cuando la fracción de hojas se reduce debido a su descomposición, la predicción no se ajusta a lo medido, generando sobreestimaciones del nivel de cobertura. Esto indica la necesidad de considerar ambos componentes (hojas y tallos) al analizar los residuos de soja. Los valores típicos de  $A_m$  para soja parecen ubicarse entre  $0,0004$  y  $0,0007 \text{ ha kg}^{-1}$ , en cambio para sus tallos se determinó un  $A_m$  de  $0,0002 \text{ ha kg}^{-1}$ .

RUSLE y WEPP utilizan la ecuación propuesta por Gregory (1982), utilizando un coeficiente para el componente soja de  $5,2 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ , es decir  $0,00052 \text{ ha kg}^{-1}$ . Siendo este valor, según la bibliografía correspondiente a un residuo de soja con hojas.

No se identificó información nacional o regional publicada acerca de los tiempos de degradación de las hojas y los tallos de soja por separado, y su correlación con la evolución en el tiempo del porcentaje de cobertura del suelo que ejercen.

## 1.7. LIMITANTES GENERALES DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DE EROSIÓN

Tal como lo explican Bagarello y Ferro (2012), el enfoque más común para determinar la confiabilidad de las estimaciones de pérdidas de suelo por erosión, es comparar valores estimados contra medidos en parcelas de escurrimiento, la cual suele realizarse mediante el uso de uno o unos pocos datos replicados para un tratamiento dado. Sin embargo, las parcelas que se pueden modelar con los

parámetros de entrada del modelo idénticos, presentan datos variables (Bagarello y Ferro, 2004, 2010, citados por Bagarello y Ferro (2012)), pero existe escasa información sobre la variabilidad natural que ocurre entre parcelas con igual tratamiento (Nearing, 2000). Si bien, ha de esperarse que una porción de la diferencia entre lo medido y lo estimado se deba a error del modelo, existe otra porción que se deberá a la varianza inexplicada del valor de la muestra medida desde el valor medio representativo para un tratamiento particular (Nearing *et al.*, 1999).

Utilizando los datos de pérdida de suelo de eventos para aproximadamente 3000 pares de parcelas replicadas, Nearing (1998) citado por Bagarello y Ferro (2012) estableció una comparación entre los valores medidos de pérdida de suelo y los que predijo el modelo físico representado por la parcela replicada. El coeficiente de determinación,  $R^2$ , fue 0,77 y se concluyó que no debe esperarse un mejor resultado para un modelo de predicción de erosión no calibrado. Coincidentemente, Laflen *et al.* (2004) consideran que, dada la variabilidad de las repeticiones de las medidas de pérdida de erosión, no se debería esperar que un modelo de erosión arroje mejores resultados que aquellos que se obtienen al comparar las repeticiones.

## 1.8. OBJETIVOS

Dada la problemática de erosión descrita anteriormente, así como las limitantes a nivel nacional para aportar en esta línea, se plantean los siguientes objetivos para este trabajo:

- 1) Comparar las estimaciones de erosión hídrica de sistemas de producción agrícolas probables en distintas zonas del Uruguay, por medio de dos modelos: USLE-RUSLE calibrado y validado para nuestro país, y WEPP, de uso incipiente en nuestras condiciones, utilizando la información disponible a la fecha. Siendo los objetivos específicos a) recopilar las bases de datos de clima y suelo, y configurar los archivos

para incluir en WEPP de 6 estaciones climáticas, 11 tipos de suelo y 10 rotaciones de cultivos; y b) correr ambos modelos y comparar sus resultados.

Hipótesis 1: Las estimaciones de erosión de largo plazo realizadas con USLE y WEPP sin calibrar no difieren.

2) Comparar las estimaciones de erosión de WEPP en los sitios donde las variables edáficas fueron ajustadas (La Estanzuela y Palo a Pique), y rotaciones con diferente proporción y ubicación de barbecho, con las estimaciones de erosión de USLE. Entiéndase barbecho como período de tiempo entre la cosecha de un cultivo y la siembra del cultivo siguiente.

Hipótesis 2: WEPP ajustado por sus variables de suelo (esfuerzo cortante crítico y conductividad hidráulica efectiva) estima erosión con una precisión comparable a la de USLE y permite cuantificar el riesgo de erosión largo y ubicación del período de barbecho.

3) Se planteó evaluar la importancia de ajustar el simulador de crecimiento de cultivos utilizado por WEPP, aun cuando se trabaja con igual rendimiento de los cultivos, en la pérdida total de suelo por erosión y los momentos en que esta se produce, así como sobre el escurrimiento.

Hipótesis 3: WEPP no estima con precisión la erosión y el escurrimiento de corto plazo si no se ajustan ciertos parámetros del cultivo a las condiciones locales, pero sí la de largo plazo.

Este último objetivo fue desarrollado también en un artículo científico redactado según las normas de la revista *Agrociencia Uruguay*, presentado en el anexo 6.1.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. COMPARACIÓN DE WEPP Y USLE EN DIVERSOS ESCENARIOS**

Se simularon 11 escenarios que pretendieron abarcar un área importante del país, con rotaciones de cultivos, o cultivos y pasturas probables en las condiciones actuales, donde fuese posible recabar información climática de largo plazo, y sobre suelos dominantes de las unidades de suelos seleccionadas por su cercanía con las estaciones climáticas. Se estandarizó la inclinación y longitud de la pendiente a fin de simplificar la simulación. De esta manera se buscó generar diferentes sistemas de frecuencia probable en el país, donde evaluar el comportamiento de los modelos con la información recopilada a la fecha.

A continuación se describe la elaboración de los once escenarios a recrear por ambos modelos WEPP y USLE, para realizar su posterior comparación.

#### **2.1.1. Elaboración de inputs para WEPP**

##### **2.1.1.1. Generación de los archivos climáticos**

Las bases de datos climáticas que se completaron corresponden a las localidades de Salto (Lat. -31,27, Long. -57,89, Alt. 47m), Paysandú (Lat. -32,17, Long. -58,08), Colonia (Lat.-34,33, Long.-57,69, Alt. 72m), Treinta y Tres (Lat. -33,26, Long. -54,48, Alt.58m), Tacuarembó (Lat.-31,70, Long.-55,82, Alt.143) y Durazno (Lat.-33,35, Long.-56,50, Alt. 92,8m), pretendiendo abarcar desde 1980 a 2012 inclusive. La información climática empleada correspondió a los registros del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), de la Dirección Nacional de Meteorología (DNM), y de Facultad de Agronomía Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC), ver cuadro en anexo 6.2.

El generador de clima empleado por WEPP, CLIGEN (Nicks *et al.*, 1995), requiere de la preparación de la información climática en archivos, denominados archivos PAR. Estos incluyen el promedio mensual, desvío estándar y coeficiente de asimetría de las variables climáticas necesarias para realizar simulaciones.

Para la generación del archivo PAR se tomaron los datos de precipitación acumulada (mm) y se calculó la media, desvío estándar y coeficiente de asimetría, así como las probabilidades de lluvia por día habiendo llovido o no el día anterior. Las series de datos de precipitación acumulada se encuentran completas para las distintas localidades. Los valores medios de temperaturas mínimas y máximas mensuales, y desvío estándar fueron calculados a partir de valores diarios y luego convertidos a grados Fahrenheit. Se emplearon los registros obtenidos en las estaciones experimentales de INIA, a excepción de Paysandú y Durazno que fueron de la DNM. Siendo esta última una serie muy incompleta.

Los valores medios mensuales de radiación solar y su desvío estándar fueron obtenidos a partir de los registros diarios de radiación solar ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) obtenidos de INIA para Salto, Treinta y Tres, Colonia, y Tacuarembó (este último comprende el período 1982-2012). De igual manera se realizó para Paysandú, información registrada en la EEMAC desde 2002 al 2012. En Durazno la radiación solar fue obtenida a partir de registros de horas de sol (DNM desde 1999 a 2005 y de 2009 a 2012), se utilizó la siguiente ecuación:

$$H(x,y) = H_0(x,y) [a(x,y) + b(x,y) n/N] \quad [5]$$

Donde "H<sub>0</sub>" es la irradiancia diaria y depende de la latitud. El mismo fue obtenido de las tablas de FAO (Allen, 2006), ingresando con 34º latitud Sur para Durazno (33.35º); "a" y "b" son coeficientes estimados para cada localidad obtenidos del Mapa Solar del Uruguay (Abal *et al.*, 2011), a= 0,23 y b=0,48 para Durazno; "n" es el número de horas de sol promedio mensual; y "N" es el promedio mensual de número máximo posible de horas de sol de cada día, valores obtenidos de tabla elaborada por FAO (Allen, 2006).



Para el cálculo del desvío estándar se utilizó la varianza obtenida con los datos diarios (Var D) y la ecuación anterior:

$$\text{Varianza mensual} = (\text{Var D}) * ((b * H_0)/N)^2 \quad [6]$$

Se convirtió el resultado a  $\text{cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$  y luego se calculó el desvío estándar.

La temperatura del punto de rocío empleada corresponde a los promedios mensuales para cada localidad, obtenidos de la Caracterización Agroclimática del Uruguay 1980-2009 (Castaño *et al.*, 2011). La humedad relativa (%) media y la temperatura promedio ( $^{\circ}\text{C}$ ) se utilizaron para calcular la temperatura de los puntos de rocío mensuales. De esta manera se logró trabajar con serie de datos de iguales dimensiones para todas las localidades. La temperatura del punto de rocío (PR) fue estimada a partir de la fórmula siguiente y también sus resultados fueron convertidos a grados Fahrenheit.

$$\text{PR} = 8\sqrt{H/100} * (112 + 0.9T) + (0.1T) - 112 \quad [7]$$

Donde "H" es humedad relativa (%) y "T" es temperatura promedio ( $^{\circ}\text{C}$ )

La localidad de Durazno no presenta los registros de viento necesarios (velocidad y dirección). Se tomó como referencia el mapa eólico de Uruguay (2009), realizado a 15 metros de altura (altura mínima del mapa), para evaluar el comportamiento del viento a lo largo del país, presentando Durazno valores intermedios a los registrados en Colonia y Salto. Por lo tanto, el criterio de la elección de los datos de viento en Durazno fue el promedio de los valores registrados en Colonia y Salto. En el caso de Paysandú se contó con una serie de datos que comprende desde 2002 a 2012 (4016 datos en total). Y la serie de Tacuarembó incluye desde diciembre del 1986 a 2012, de manera incompleta, sumando una totalidad de 9515 datos. Los registros de las demás estaciones son de INIA y se encuentran completos desde 1980 a 2012. Los datos de viento se convirtieron a  $\text{m s}^{-1}$ , se calculó la media, desvío estándar y coeficiente de asimetría con los datos diarios. Debido a la carencia de información sobre el porcentaje de las distintas direcciones de los vientos, se utilizó el mismo para cada una de ellas, es decir que se consideró que los vientos rotan en todas las direcciones con la misma magnitud.

El archivo PAR a su vez requiere las variables “Media máxima diaria de intensidad de precipitación en 30 minutos” (pulgadas hora<sup>-1</sup>) y “Tiempo al pico de intensidad de lluvia”, que es una distribución acumulada de valores de tiempo al pico de intensidad de precipitaciones. Estas variables se obtienen del registro de lámina (mm) cada 10 minutos, y ambas fueron tomadas de Jorge (sin publicar), quien las elaboró en base a registros de pluviógrafo de Colonia desde 1984 al 1990. Los archivos PAR de las restantes estaciones fueron completados con estos mismos datos, a falta de registros para las mismas de esos años.

Estos archivos PAR fueron necesarios para generar los archivos de clima observado, que contienen las precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas diarias durante el período 1980-2012 para todas las estaciones, excepto Tacuarembó donde el período comprendido fue 1986-2012. Con estos se realizaron todas las simulaciones de WEPP. Las temperaturas mínimas menores o iguales a 0 °C se sustituyeron por 0,1 °C cuando se registraron precipitaciones, de manera que el modelo no simule nieve en lugar de lluvia. Las demás variables fueron generadas por CLIGEN.

Se realizaron análisis de sensibilidad para determinar el error de la utilización de bases climáticas incompletas. Para ello se tomaron como referencia las series de Colonia y de Salto, por encontrarse completas, en sitios geográficamente distantes entre sí. Con las mismas se calcularon los parámetros necesarios para crear el archivo PAR que requiere CLIGEN para generar clima sintético. Dichos parámetros se estimaron con la totalidad de los datos y sucesivamente con menor número de datos hasta simular las carencias de las localidades con series climáticas incompletas.

Se empleó la versión 5.x de CLIGEN a los efectos de generar los archivos climáticos necesarios para llevar a cabo las simulaciones.

### 2.1.1.2.Suelo

Se seleccionaron unidades y tipos de suelo próximos a las estaciones meteorológicas que pudieran presentar agricultura. Los mismos se presentan en el cuadro 1. La información de suelos requerida por WEPP incluye profundidad (mm), porcentaje de arena y arcilla, materia orgánica, y capacidad de intercambio catiónico ( $\text{meq } 100\text{gr}^{-1}$ ), por cada horizonte del perfil. Fue tomada de los Tomos I y II de la Carta de Reconocimiento de suelos de Uruguay (Altamirano *et al.*, 1976). Los valores de erodabilidad del suelo (canalículos y zona entre canalículos) y esfuerzo cortante crítico fueron estimados por el modelo, ya que no existe información nacional. La conductividad hidráulica efectiva fue estimada según lo sugerido por Jorge *et al.* (2011), con la fórmula de Jury y Horton (2004) en base a la conductividad hidráulica de cada horizonte, permitiendo así, tener en cuenta el posible efecto del horizonte B, enriquecido en arcilla, sobre la infiltración. Las mismas se hallaron siguiendo las dos fórmulas utilizadas por el modelo WEPP para calcular  $K_b$  (conductividad hidráulica base), según el porcentaje de arcilla sea mayor a 40%:

$$K_b = 0.0066 \text{ EXP}(244/\text{Arcilla}) \quad [8]$$

o menor o igual a 40% (Flanagan y Nearing, 1995):

$$K_b = -0,265 + 0,0086 * \text{Arena}1,8 + 11,46 * \text{CIC}(-0,75) \quad [9]$$

Siendo "CIC" la capacidad de intercambio catiónico.

En el caso del Brunosol de la unidad Ecilda Paullier-Las Brujas, se utilizaron los valores de esfuerzo cortante crítico (3 Pa) y conductividad hidráulica efectiva ( $6 \text{ mm h}^{-1}$ ) ajustados por Jorge (2012) del mismo suelo a utilizarse en USLE.

Todas las simulaciones fueron realizadas con una inclinación de la pendiente de 3,5% un largo de 100 m y configuración plana.

### 2.1.1.3. Rotaciones de cultivos

Las rotaciones fueron seleccionadas en colaboración con técnicos del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, técnicos de campo y académicos, según su apreciación sobre su frecuencia en las distintas zonas. Se presentan también en el cuadro 1. Todas las rotaciones se simularon bajo siembra directa.

Cuadro 1. Unidades, tipo de suelo y uso de suelo escogidos por localidad.

Localidad	Unidad	Suelo	Uso del suelo*
<b>Treinta y Tres</b>	J. Pedro Varela	Brunosol Subéutrico Luvico F	S-Cob-S-Cob-S-PP1-PP2-PP3
<b>Durazno</b>	Alferez	Brunosol Subéutrico Luvico L	S-Cob-S-Cob-S-Cob-SG-Cob
<b>Paysandú</b>	La Carolina	Brunosol Éutrico Típico Fr	S-T-S-Cob-M-BQ
	Trinidad	Brunosol Éutrico Típico Fr	S-T-S-Cob-SG-PP1-PP2-PP3
<b>Salto</b>	Young	Brunosol Éutrico Típico Fr	C-S-T-SG-BQ-S-T-S-Cob-S
	Chapicuy	Brunosol Subéutrico TípicoAr r	C-S-T-SG-BQ-S-T-S-Cob-S-PP1
<b>Colonia</b>	Itapebí 3 árboles	Brunosol Éutrico Típico Lac v.	C-S-T-SG-BQ-S-T-S-Cob-S
<b>Tacuarembó</b>	Ecilda Paullier LB	Brunosol Éutrico Típico Fr	S-T-S-BQ-M-BQ
	La Carolina	Brunosol Éutrico Típico Fr	S-T-S-Cob-S-T-M-BQ
<b>Tacuarembó</b>	Paso Cohelo	Vertisol Haplico Lac	S-Cob
	Pueblo del Barro	Brunosol Éutrico Típico Lac v.	S-Cob-S-T-SG-BQ

\*S: soja, T: trigo, C: cebada, M: maíz, SG: sorgo, PP: pasturas, Cob: cultivo de cobertura, BQ: barbecho químico.

Los cultivos fueron seleccionados dentro de las opciones por defecto que incluye WEPP, ajustándose únicamente el Biomass Energy Ratio (BER), a los efectos de obtener rendimientos similares a los promedios nacionales entre el 2000 y el 2012 (DIEA). Los únicos modificados fueron trigo, en el que se empleó un BER de 25 y soja de primera, modificándose a un BER de 24.

Cuando se incluyeron pasturas se corrigió la temperatura crítica de congelamiento, de manera que sea superior a la mínima encontrada en la base

climática. De lo contrario el modelo hace morir el cultivo y rebrotar cada vez que se excede dicha temperatura.

Las rotaciones debieron plantearse comenzando siempre por la cosecha del cultivo de verano, así se impide que el modelo deje un año sin cultivos entre el fin y el inicio de un nuevo ciclo de la rotación.

### **2.1.2. Elaboración de insumos para USLE**

Se empleó el programa Erosión 6.0 (García Préchac *et al.*, 2009). El mismo se utilizó con los suelos, inclinación y largo de pendiente, y las rotaciones iguales a los mencionados en cuadro 1. Las rotaciones presentaron la misma secuencia de cultivos, sin embargo, las fechas en que se siembra o cosecha el mismo presenta diferencias, ya que este programa permite trabajar a escala mensual y no diaria. A su vez el porcentaje de suelo cubierto en diferentes momentos se encuentra limitado a las opciones de cada caso. En el anexo 6.3 cuadro 1, se presentan los valores del factor C generados para cada situación.

Las estaciones climáticas ya se encuentran incluidas dentro del programa Erosión 6.0, sin embargo, están compuestas por una serie de años diferentes a los propuestos en este trabajo. Es por ello que se utilizaron valores del factor R calculados con el coeficiente modificado de Fournier (Renard y Freimund, 1994) para las estaciones en cuestión y una serie de años similar a la utilizada en WEPP (1980-2009) elaborados por Pérez M (sin publicar).

## **2.2. COMPARACIÓN ENTRE USLE Y WEPP EN COLONIA Y TREINTA Y TRES**

Se emplearon las estaciones climáticas generadas con datos observados de Colonia y Treinta y Tres, tal como fuese descripto en el punto 2.1.1.1.

Los suelos seleccionados fueron aquellos donde las variables esfuerzo cortante crítico y conductividad hidráulica efectiva fueron ajustadas por Jorge (2012). El archivo de suelo de Ecilda Paullier- Las Brujas fue el mismo que el utilizado anteriormente. Se generó el archivo de suelo Argisol subéutrico de la unidad Alférez, de la misma manera como se describió en el punto 2.1.1.2. También para este suelo se utilizaron los valores de esfuerzo cortante crítico (2,3 Pa) y conductividad hidráulica efectiva ( $2,19 \text{ mm h}^{-1}$ ) ajustados por Jorge (2012). La inclinación de la pendiente fue 3,5%, con configuración plana y largo de pendiente 100 m.

Las rotaciones planteadas con el objetivo de evaluar proporción y ubicación del barbecho fueron 3, ordenadas de la siguiente manera para correr en WEPP:

- 1) S- BQ (50% de tiempo en barbecho)
- 2) S- T- S- BQ (25% tiempo en barbecho)
- 3) S- BQ- S- T (25% tiempo en barbecho)
- 4) S- T- S- Cob- M- BQ (16,7% tiempo en barbecho)
- 5) S- Cob- M- BQ- S- T (16,7% tiempo en barbecho)
- 6) M- BQ- S- T- S- Cob (16,7% tiempo en barbecho)

S: soja, T: trigo, M: maíz, Cob: cultivo de cobertura, BQ: barbecho químico.

Los valores del factor "R" en el programa Erosión 6.0 fueron modificados de manera de contemplar el período 1980-2009, más ajustado a la serie de años de las bases de datos climáticas con que se configuraron los archivos (1980-2012).

Las rotaciones a ejecutar por Erosión 6.0 fueron las mismas 3, sin diferenciar la ubicación del barbecho en la rotación.

## 2.3. SIMULACIÓN DE CULTIVOS CON WEPP

### 2.3.1. Ajuste de parámetros de crecimiento de soja

La figura 1 muestra de forma esquemática el procedimiento llevado a cabo para ajustar los parámetros correspondientes al crecimiento de soja. En primer lugar, con información sobre la sensibilidad de los parámetros de crecimiento del cultivo (sub modelo de WEPP) y los parámetros conocidos de la calibración y validación del Cropsyst (Stöckle *et al.*, 2003) en Uruguay (Ernst *et al.*, 2013), se generaron los “parámetros del cultivo ajustado” para una soja continua. Los valores empleados para el ajuste se indican en el cuadro 2. Por otra parte, tal como lo sugieren Flanagan *et al.* (2012), se seleccionó del modelo WEPP el cultivo “Soybeans- High Fertilization Level”, se constató que produjera igual rendimiento que la soja ajustada, (rendimiento que es probable para una soja de primera para esa zona del país) y se los denominó “parámetros del cultivo sin ajustar”. Se realizaron 3 simulaciones, una con el modelo Cropsyst, donde se simuló el crecimiento de una soja de grupo de madurez 5.9, sembrada el 1º de Noviembre y cosechada el 30 de Abril, cuyo rinde promedio para el período 1980-2012 con este modelo fue de aproximadamente 3200 kg ha<sup>-1</sup>. Las otras dos simulaciones fueron realizadas por el sub modelo de crecimiento del cultivo en WEPP, con los parámetros ajustados y sin ajustar. Se obtuvieron tres curvas de crecimiento de cultivo diferentes, las cuales se contrastaron entre sí. A su vez, se compararon las salidas de erosión estimadas con WEPP a partir de los archivos “ajustado” y “sin ajustar” del cultivo.

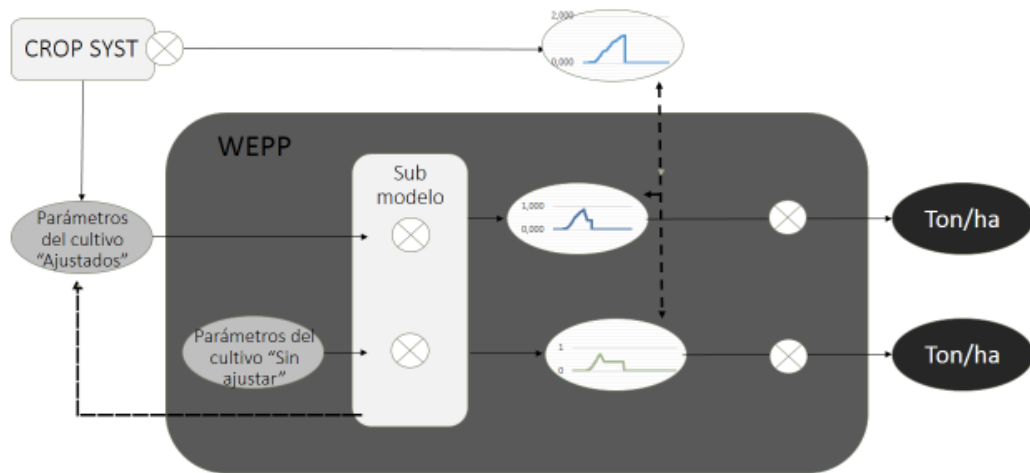


Figura 1. Esquema del ajuste de parámetros de crecimiento del cultivo en WEPP. Las cajas representan modelos, los óvalos representan datos, círculos son corridas de modelo, líneas enteras son flujos de datos, líneas punteadas corresponden a flujos de información.

La sensibilidad de los parámetros para el modelo se determinó por el coeficiente de sensibilidad “S” extraído de Chartier y Rostagno (2010) de acuerdo a la ecuación [10].

$$S = \frac{(R_2 - R_1) / R_{12}}{(Pe_2 - Pe_1) / Pe_{12}} \quad [10]$$

En la que, “R<sub>1</sub>” y “R<sub>2</sub>” son el valor más bajo y más alto en la respuesta del modelo (escurrimiento o erosión) para los valores más bajo y más alto de los parámetros de entrada (“Pe<sub>1</sub>” y “Pe<sub>2</sub>”), de cada variable analizada. “R<sub>12</sub>” es el promedio de los dos resultados del modelo y “Pe<sub>12</sub>” es el promedio de “Pe<sub>1</sub>” y “Pe<sub>2</sub>”. El parámetro “S” representa un cambio relativo normalizado en las variables permitiendo de esta manera la comparación de las sensibilidades de los parámetros de entrada los cuales generalmente tienen distintos órdenes de magnitud (Nearing et al., 1990 citados por Chartier y Rostagno (2010)). Valores de S en torno a cero indicarían que el modelo es poco sensible a cambios en dicho parámetro. Valores positivos o negativos de S indicarían incrementos o disminuciones en la respuesta del modelo cuando se incrementa o disminuye el valor del parámetro de entrada respectivamente. El valor absoluto de S indicaría el grado del cambio o importancia de la sensibilidad.



Cuadro 2. Parámetros del cultivo de soja en el modelo WEPP, ajustados y sin ajustar.

Parámetros del modelo	Sin ajustar	Ajustada
*Relación biomasa energía (kg MJ <sup>-1</sup> )	25	20
Grados día a emergencia (°C d <sup>-1</sup> )	60	100
*Grados día en la estación de crecimiento (°C d <sup>-1</sup> )	1150	2500
Distancia entre plantas en la hilera (cm)	2,5	7,5
Altura del rastrojo en pie luego de cosecha (cm)	15,2	10
*Índice de cosecha (%)	50	40
*Temperatura base (°C)	10	5
*Temperatura óptima para el crecimiento (°C)	25	28
Máxima profundidad de raíces (cm)	100	140

\*Fueron los parámetros detectados como más sensibles del modelo.

Las simulaciones realizadas en ambos escenarios fueron hechas considerando una pendiente de 3,5% y 100 m de largo y configuración plana, suelo Brunosol éútrico de la Unidad Ecilda Paullier-Las Brujas, clima Colonia 1980 al 2012 inclusive.

### 2.3.2. Datos experimentales de escurrimiento

Se utilizaron los datos del período 2009-2012, generados en las parcelas de escurrimiento instaladas en INIA La Estanzuela bajo siembra directa, con rotación soja continua. La caracterización de las parcelas así como la metodología para la determinación del escurrimiento es la que se detalla para las parcelas instaladas en La Estanzuela a partir del año 1984 por Hill *et al.* (2008). Se seleccionó la parcela cuyos registros de escurrimiento fueron los mayores, de manera que represente el escenario de mayor riesgo medido. Los mismos fueron comparados con el escurrimiento generado por WEPP cuando los parámetros del cultivo de soja fueron ajustados tal cual se describió anteriormente, y presentados en forma de cuadros y figuras.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. ESTIMACIONES DE EROSIÓN HÍDRICA CON USLE Y WEPP

##### 3.1.1. Creación de las bases de datos climáticas

Del análisis de sensibilidad del error producido por utilizar series incompletas de temperatura máxima y mínima, sobre el valor promedio y el desvío estándar, realizado con registros de Colonia (presentado en el anexo 4, figuras 1, 2, 3 y 4) y también con registros de Salto, se concluye que dichas series de registros, aun incompletas, son aptas para este estudio. Las mismas corresponden a las estaciones de Tacuarembó (registros 1987-2012, aproximadamente 9500 datos) y Durazno (serie incompleta de registros 1980-2012, 11088 datos en total).

La temperatura del punto de rocío en todas las estaciones se estimó con promedios mensuales de la Caracterización Agroclimática (Castaño *et al.*, 2011), ya que se observa que disminuir en 3 años la serie de datos de diarios, no repercutió en la temperatura del punto de rocío mensual obtenido, y no se pudo trabajar con los datos diarios ya que no se obtuvieron las series de datos para Durazno y Paysandú, y fueron incompletos para Tacuarembó y Treinta y Tres. Ver anexo 4, figuras 5 y 6.

La radiación solar estimada a partir de horas de sol (con una serie de registros incompleto en torno a 4000 datos) como la de Durazno y una base de registros de pocos años como la de Paysandú, permitieron de igual manera configurar los archivos climáticos con promedios y desvío estándar con errores aceptables para este trabajo (ver anexo 4, figuras 7, 8 y 9).

Para la variable viento se encontraron las mayores diferencias, sobre todo en el desvío y coeficiente de asimetría (ver anexo 4, figuras 10, 11 y 12). Sin embargo, no es la variable de mayor impacto sobre las estimaciones de erosión, por lo que se utilizaron de todos modos las bases de datos incompletas para Paysandú y Tacuarembó.

### 3.1.2. Estimación de erosión con WEPP y Erosión 6.0

El cuadro 3 y la figura 2 muestran los resultados de las estimaciones a largo plazo de USLE con el factor R modificado para cada localidad, y de WEPP con clima observado desde 1980 al 2012 inclusive (excepto para Tacuarembó, 1987 al 2012). La erosión promedio estimada con USLE fue 6,1 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, en tanto con WEPP fue 4,8 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. Sin embargo, las diferencias de las estimaciones entre ambos modelos oscilan entre 3 y 94%. Así mismo el ordenamiento del nivel de riesgo de los 11 casos es diferente. Por ejemplo, al emplear USLE el sistema más riesgoso es el que se presenta sobre el suelo de la unidad Alferez, en tanto para el modelo WEPP es el que se presenta sobre Unidad La Carolina en Durazno.

Cuadro 3. Pérdida de suelo por erosión estimada con WEPP y Erosión 6.0 (Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>), su diferencia relativa, para los diferentes sistemas de producción.

Unidad de suelos	Localidad	Uso del suelo*	Erosión 6.0	WEPP
			Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	
J. Pedro Varela	Treinta y Tres	S-Cob-S-Cob-S-PP1-PP2-PP3	7,2	3,7
Alferez	Treinta y Tres	S-Cob-S-Cob-S-Cob-SG-Cob	9,9	5,0
La Carolina	Durazno	S-T-S-Cob-M-BQ	3,4	6,6
Trinidad	Durazno	S-T-S-Cob-SG-PP1-PP2-PP3	2,7	4,0
Young	Paysandú	C-S-T-SG-BQ-S-T-S-Cob-S	4,8	5,7
Chapicuy	Paysandú	C-S-T-SG-BQ-S-T-S-Cob-S-PP1	4,9	5,4
Itapebí 3 árboles	Salto	C-S-T-SG-BQ-S-T-S-Cob-S	6,6	4,8
Écilda Paullier LB	Colonia	S-T-S-BQ-M-BQ	6,2	5,4
La Carolina	Colonia	S-T-S-Cob-S-T-M-BQ	5	4,9
Paso Cohelo	Tacuarembó	S-Cob	7,1	3,7
Pueblo del Barro	Tacuarembó	S-Cob-S-T-SG-BQ	9,7	3,9

\*S: soja, T: trigo, C: cebada, M: maíz, SG: sorgo, PP: pasturas, Cob: cultivo de cobertura, BQ: barbecho químico.

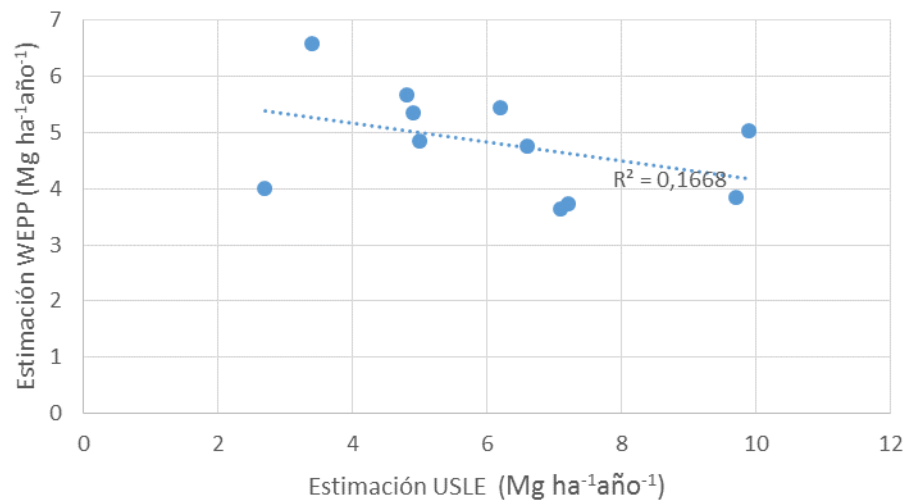


Figura 2. Correlación entre la estimación de pérdida de suelo utilizando Erosión 6.0 y WEPP.

Erosión 6.0 estima una amplitud de pérdidas de erosión mayor que WEPP (2,7 a 9,9 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> y 3,65 a 6,58 Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> respectivamente), lo que coincide con lo citado por Sparovek *et al.* (2000) en el estudio que compara ambos modelos en una cuenca en que los mismos no fueron calibrados.

En la figura 3 se presenta la diferencia relativa de la estimación de WEPP respecto a la de Erosión 6.0. Tal como se muestra, el efecto de la localidad parece ser más influyente que los modelos sobre las estimaciones de erosión. En la simulación realizada con WEPP, las estaciones climáticas no presentan su media máxima diaria de intensidad de precipitación en 30 minutos, ni tiempo al pico de intensidad de lluvia estimado para cada estación. La única estación que presenta datos locales de dichas variables es Colonia, que fue realizado con una serie corta de años. Por lo que, de ajustarse dichas variables, podrían esperarse cambios en este patrón, y así generar diferencias con las estimaciones de Erosión 6.0.

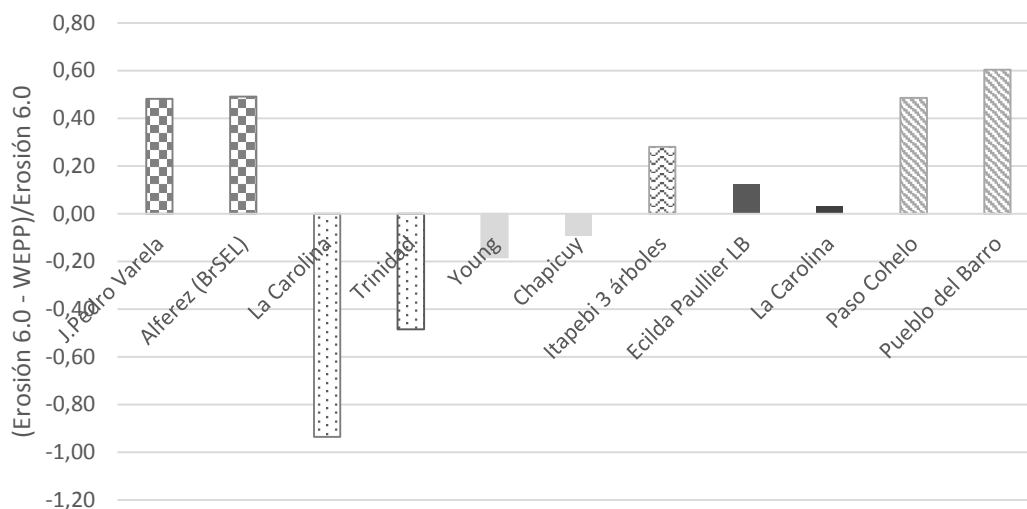


Figura 3. Diferencia relativa en estimación de erosión de WEPP respecto a Erosión 6.0, para cada escenario simulado, y diseño según localidad: Treinta y Tres (cuadros), Durazno (puntos), Paysandú (gris claro liso), Salto (zig-zag), Colonia (gris oscuro liso) y Tacuarembó (rayas oblicuas).

Tiwari *et al.* (2000) cuando compararon las estimaciones de estos modelos, sin previa calibración de WEPP, obtuvieron resultados en los que WEPP produjo estimaciones tanto mayores como menores que USLE, según los diferentes sitios. Por otra parte, otros estudios muestran resultados en los que las estimaciones de erosión son consistentemente mayores en un modelo respecto al otro. Por ejemplo, Sparovek *et al.* (2000), al comparar estimaciones realizadas por WEPP y USLE en cultivo de caña de azúcar, este último modelo estimó mayor erosión promedio que WEPP. En este caso ocurre en las localidades Treinta y Tres, Salto, Tacuarembó y en menor medida en Colonia. Los autores se lo atribuyen a los supuestos asumidos por los diferentes métodos de predicción. La sobre estimación de USLE respecto a lo medido en condiciones experimentales es explicada por el largo y complejidad de la pendiente en condiciones reales respecto a las parcelas (22 metros) que casi no registran sedimentación. A su vez, Nearing *et al.* (1990) citados por Sparovek *et al.* (2000) adjudican parte de esta diferencia a una menor sensibilidad a los parámetros

relacionados a los cultivos y a una mayor sensibilidad a los factores topográficos de RUSLE respecto a WEPP.

### 3.2. ESTIMACIONES DE EROSIÓN EN DOS SUELOS CONTRASTANTES DEL PAÍS

Una vez que se constató la diferencia en las estimaciones de erosión obtenidas con los modelos sin previo ajuste en WEPP, se realizaron las simulaciones en dos localidades (Colonia y Treinta y Tres) con suelos contrastantes (Brunosol éutrico de Ecilda Paullier-Las Brujas y Argisol subéutrico de Alférez), donde Jorge (2012) realizó ajustes al modelo WEPP. El cuadro 4 muestra los resultados de dichas estimaciones.

Cuadro 4. Estimaciones de erosión de WEPP y Erosión 6.0 ( $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ), para dos suelos, y tres rotaciones.

Rotación	Ecilda Paullier LB		Alférez	
	WEPP ( $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ )	Erosión 6.0 ( $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ )	WEPP ( $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ )	Erosión 6.0 ( $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ )
S- BQ	7,8	13,5	14,4	41,2
S- T- S- BQ	5,7	6,2	10,4	18,6
S- BQ- S- T	5,5	6,2	9,2	18,6
S- T- S- Cob- M- BQ	4,5	4,4	7,2	13,4
S- Cob- M- BQ- S-T	4,8	4,4	7,5	13,4
M- BQ- S- T- S-Cob	4,5	4,4	7,6	13,4

Nota: "S": soja, "T": trigo, "M": maíz, "Cob": cultivo de cobertura, "BQ": barbecho químico.

Ambos modelos estiman pérdidas de erosión de suelo mayores en el sistema ubicado en la Unidad Alférez. También coinciden en que rotaciones con mayor proporción de barbecho generan mayores pérdidas de erosión, en ambos sistemas.

Dada la amplia variabilidad que es esperable encontrar en los valores de erosión medidos en parcelas, RUSLE2 considera que cambios menores al 10% en las estimaciones de erosión no son significantes (USDA, 2008). De esta manera puede

considerarse que dentro de cada localidad no existen diferencias en estimaciones de largo plazo entre rotaciones iguales con diferente ubicación del período de barbecho, excepto para Soja-Trigo-Soja-Barbecho sobre la unidad Alférez, en la que se presentaría un valor algo superior (11,5%). El resultado era esperable, siendo la misma rotación, la estimación tiende a un mismo valor de pérdida de suelo promedio en el largo plazo. Sin embargo, cuando se observa la erosión estimada por WEPP en períodos de tiempo más cortos dentro de dicha serie de años, las diferencias por comenzar en momentos distintos la misma rotación, son notorias (ver figura 4). Cuando se tomaron los promedios cada 4 años (2 largos de rotación), se observan diferencias de hasta un 48% (ver cuadro 5).

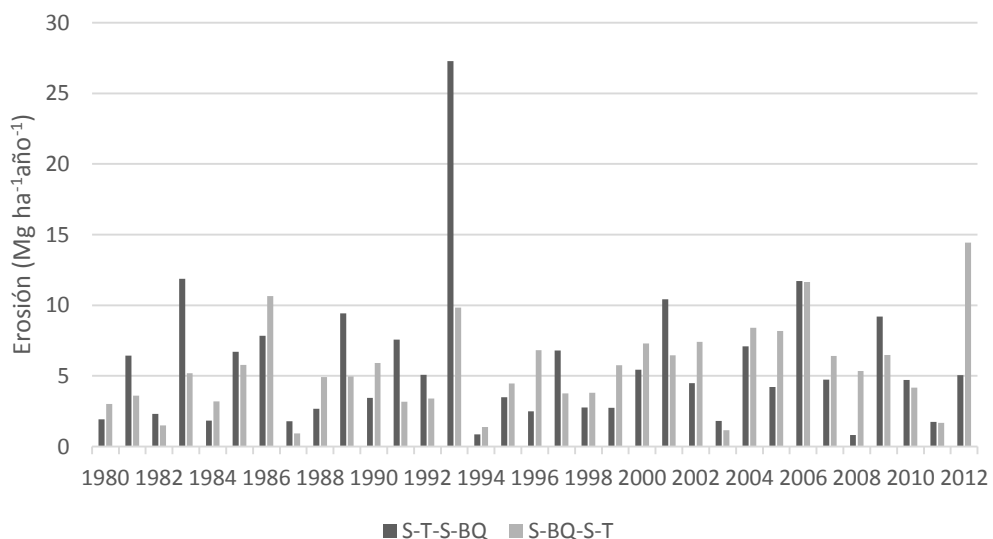


Figura 4. Erosión estimada (Mg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>) por WEPP ubicando el período de barbecho en el segundo año (gris claro) o en el primero (negro) de la rotación soja-trigo-soja-barbecho, para el período 1980-2012 inclusive, en Colonia.

Cuadro 5. Estimación de erosión promedio ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) cada 4 años, según la ubicación del período de barbecho fuese en el segundo (S-T-S-BQ) o primer año (S-BQ-S-T).

	S-T-S-BQ	S-BQ-S-T
	$(\text{Mg ha}^{-1})$	
<b>1980-1983</b>	5,64	3,33
<b>1984-1987</b>	4,55	5,14
<b>1988-1991</b>	5,78	4,74
<b>1992-1995</b>	9,18	4,78
<b>1996-1999</b>	3,70	5,04
<b>2000-2003</b>	5,55	5,59
<b>2004-2007</b>	6,94	8,66
<b>2008-2012</b>	4,31	6,42

Esta simulación pone de manifiesto la importancia de rotar no sólo en tiempo, sino también en el espacio, de manera de disminuir el riesgo de pérdidas de suelo por erosión en toda el área del sistema. Cabe aclarar que WEPP no es capaz de acumular en su estimación los efectos del daño por erosión producidos año a año, ya que considera que el suelo mantiene en el tiempo las características con las que se da inicio a la simulación.

La estimación de la rotación más simple, soja continua, sobre la unidad Alférez, fue casi 3 veces mayor en Erosión 6.0 que en WEPP, lo que evidencia diferencias en las estimaciones de erosión entre ambos modelos. Se estimó el Factor C (Berc *et al.*, 2003) producido por soja continua en ambos modelos a través de la relación entre la erosión promedio simulada en el período 1980-2012 en una ladera de 22 metros de longitud, 9% la inclinación de la pendiente del cultivo de soja, y el mismo suelo desnudo laboreado cinco veces en el año. Los factores estimados fueron 0,206 en USLE ( $60,9 / 295,6$ ) y 0,045 en WEPP ( $13,39 / 298,65$ ). De acuerdo a los resultados, la diferencia entre ambos modelos radica en el efecto diferencial de la cobertura sobre la erosión, ya que estiman lo mismo para el suelo desnudo. A su vez, el factor C



estimado con WEPP es del mismo orden que el reportado en la región en rotaciones que incluyeron soja bajo siembra directa (0,061)(Scotta y Gvozdenovich, 2014).

El factor C estimado en el sistema simulado en unidad Ecilda Paullier-Las Brujas arrojó resultados similares a lo estimado en el caso anterior: 0,204 (USLE) y 0,054 (WEPP). Sin embargo, sí hubo notorias diferencias en cuanto a la erosión considerada por ambos modelos al suelo ubicado en la unidad de Ecilda-Paullier. Cuando se simuló las condiciones de parcelas de escurrimiento, con suelo desnudo y laboreado, Erosión 6.0 estimó una pérdida de  $98 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  y WEPP  $137,6 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ . Se atribuye a este motivo que las diferencias en estimación de pérdida de suelo son menores entre ambos modelos para el sistema simulado en Ecilda Paullier-Las Brujas, en el cual parecen compensarse, un factor C más bajo, pero un factor K más alto.

### **3.3. EFECTO DE LA MODELACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL CULTIVO SOBRE EL ESCURRIMIENTO Y LA EROSIÓN**

En la medida en que el impacto del uso y manejo del suelo (factor C) sobre la erosión estimada difiere entre ambos modelos, se estudió el impacto del crecimiento del cultivo sobre las estimaciones de escurrimiento y erosión con el modelo WEPP.

#### **3.3.1. Ajuste de los parámetros de crecimiento del cultivo**

En la figura 5 se presentan las curvas de acumulación de biomasa obtenidas por los modelos Cropsyst y WEPP (con los parámetros del cultivo ajustados y sin ajustar) de un sistema de soja continua, con el fin de ilustrar en un año su comportamiento. Las simulaciones fueron realizadas para el período 1980-2012, con registros climáticos de Colonia, y el Brunosol éutrico de Ecilda Paullier-Las Brujas ajustado, como se simuló anteriormente.

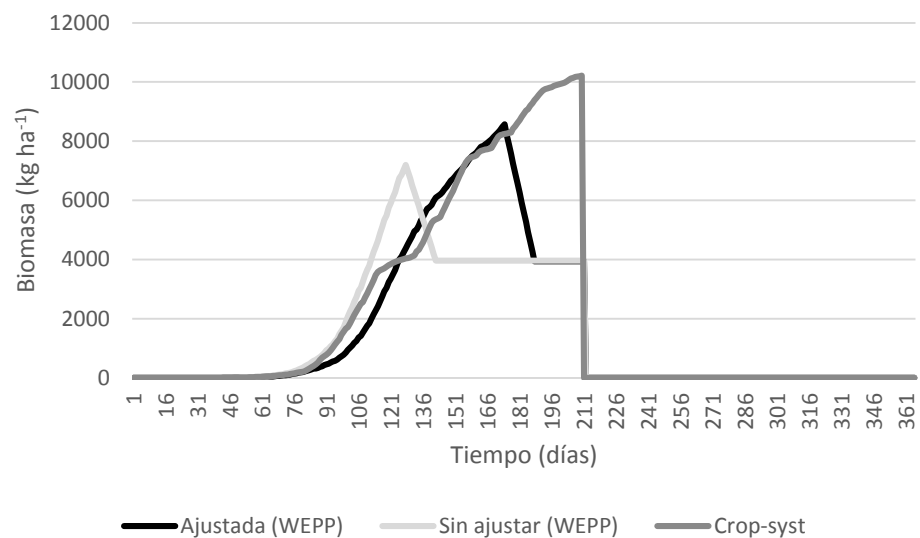


Figura 5. Curvas de acumulación de biomasa viva ( $\text{kg m}^{-2}$ ) desde la siembra del cultivo hasta la siembra del cultivo siguiente, soja ajustada y sin ajustar con WEPP, y simulada por Cropsyst, durante la zafra 1981-1982.

El punto de madurez fisiológica difiere enormemente entre la curva arrojada por Cropsyst y la simulada por WEPP con los parámetros sin ajustar (74,4 días en promedio entre uno y otro). El ajuste de parámetros permitió retrasar el punto de madurez fisiológica en 44 días en promedio, reduciendo la diferencia en un 59% entre la simulación de WEPP sin ajustar y la realizada con Cropsyst. A su vez, permitió simular un pico máximo de biomasa mayor, asemejándose a la curva calibrada con Cropsyst. La diferencia absoluta en el pico máximo de producción de biomasa fue en promedio  $2918 \text{ kg ha}^{-1}$  entre lo simulado por Cropsyst y lo simulado por WEPP sin ajuste previo de parámetros del cultivo. El ajuste de dichos parámetros permitió reducir a  $1774 \text{ kg ha}^{-1}$  la diferencia absoluta de máxima producción de biomasa respecto a la simulación de Cropsyst, es decir que redujo la diferencia entre los máximos en un 39%.

Sin embargo, a través de los años, las diferencias en el máximo de producción de biomasa entre simulaciones no se mantuvieron constantes. Se tomaron las precipitaciones ocurridas durante el período del cultivo (noviembre a abril) y se clasificaron los años como "normales" aquellos que se encontraban dentro del

intervalo 451 mm y 845 mm (intervalo definido por +/- un desvío de la media), “déficit” aquellos de menos de 451mm, y “superávit” aquellos con precipitaciones mayores a 845 mm. En años donde las condiciones hídricas son limitantes para el cultivo (ver figura 6), el ajuste de parámetros en WEPP no asegura un nivel de producción de biomasa acorde a la calibrada con Cropsyst.

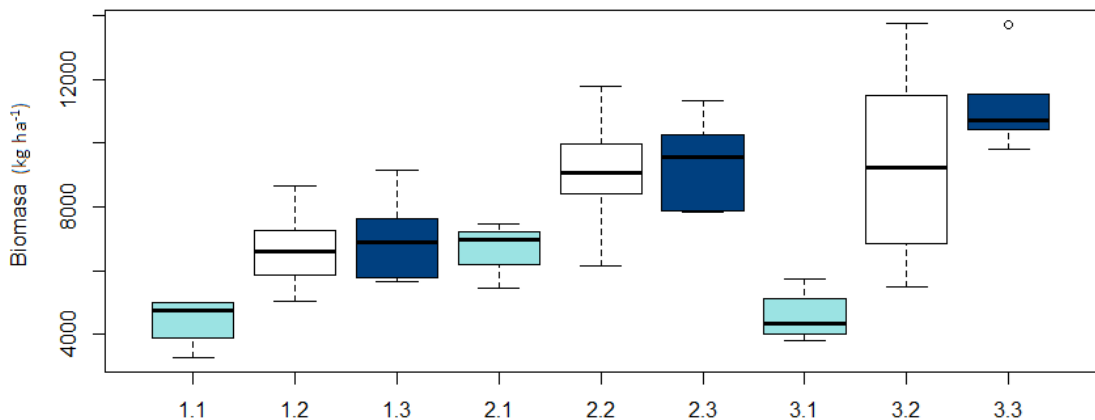


Figura 6. Máxima biomasa producida ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) según tipo de simulación: WEPP con parámetros sin ajustar y año déficit (1.1.), normal (1.2) y superávit (1.3); WEPP con parámetros ajustados y año déficit (2.1), normal (2.2) y superávit (2.3); Cropsyst y año déficit (3.1), normal (3.2) y superávit (3.3).

Estas diferencias no se expresan tan claramente en las comparaciones de largo del ciclo, ya que en años de déficit la diferencia promedio es sólo 5 días mayor que en que en el promedio de años de superávit de precipitaciones, tanto en la diferencia Cropsyst – WEPP con parámetros ajustados como sin ajustar.

### 3.3.2. Impacto del ajuste sobre la estimación de erosión

El cuadro 5 muestra el impacto que genera la modificación de la curva de crecimiento del cultivo en el escurrimiento, erosión y rendimiento del cultivo estimado por el modelo WEPP.

Cuadro 5. Esgurrimiento, erosión y rendimiento de soja estimados con WEPP con los parámetros del cultivo de soja sin ajustar y modificados.

	Sin ajustar	Ajustada
Precipitaciones (mm)	1129,1	1129,1
Esgurrimiento (mm)	282	263
Erosión (Mg ha <sup>-1</sup> )	7,83	5,87
Rendimiento promedio de soja (kg ha <sup>-1</sup> )	3190	3260

La soja ajustada generó en el largo plazo un 25% menos de erosión anual promedio que la soja de alta fertilización propuesta por WEPP, sin ajustar, y un 7% menos de esgurrimiento, por lo que resulta un factor importante a la hora de utilizar el modelo. Flanagan *et al.* (2012), coincidentemente, remarcan la importancia de lograr simulaciones apropiadas de crecimiento de cultivos, entre otros, previo a realizar simulaciones continuas con WEPP.

La figura 7 muestra los momentos en que se producen esas diferencias de erosión en el largo plazo, ya que los ajustes de los parámetros se traducen en diferencias en el momento del pico máximo de biomasa acumulada y los momentos de mínimo y máximo de cobertura del suelo por rastrojo. Se destaca que el total acumulado mensual de suelo erosionado presenta una alta correlación con el número de eventos erosivos con pérdidas mayores a 2 Mg ha<sup>-1</sup>, siendo el R<sup>2</sup>= 0,88, presentado en la figura 8.

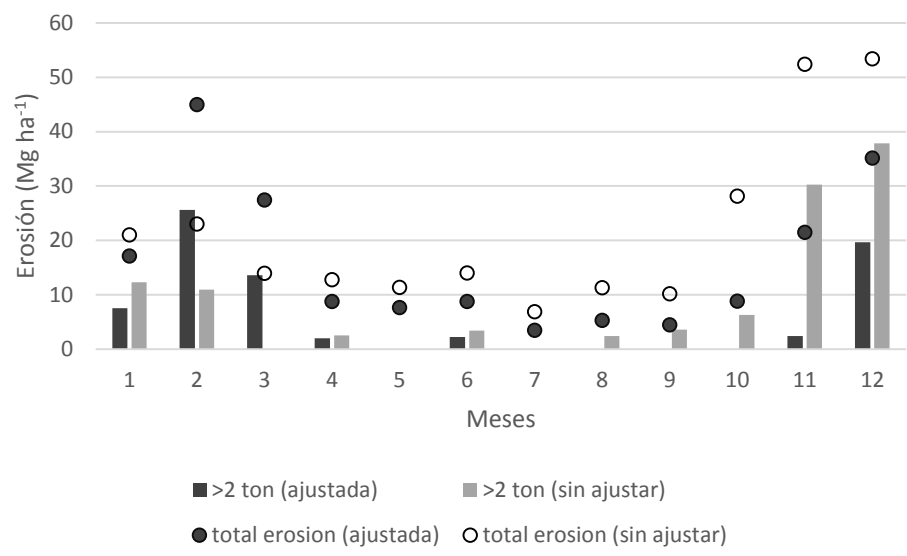


Figura 7. Erosión acumulada ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) y erosión ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) producida por eventos erosivos mayores a 2 toneladas por hectárea, bajo soja sin ajustar y ajustada, para el período 1980-2012.

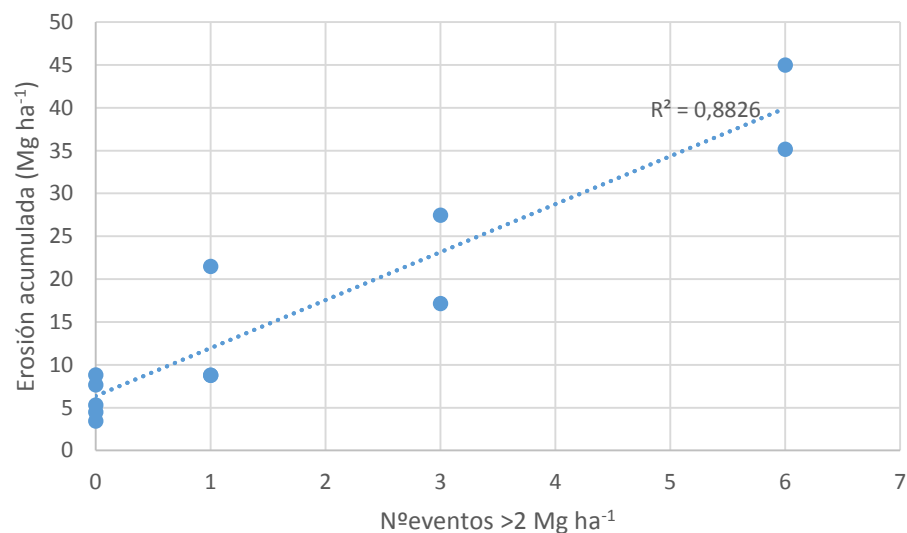


Figura 8. Correlación entre el total de erosión acumulada ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) y el número de eventos que produjeron erosión mayor a 2  $\text{Mg ha}^{-1}$ .

WEPP simuló niveles de cobertura por rastrojo diferentes según los parámetros de crecimiento del cultivo fuesen ajustados o no. En el cuadro 6 se muestran los

niveles de cobertura en momentos del año en los que se producen diferencias en el total acumulado mensual de erosión entre 18 y 30 toneladas.

Cuadro 6. Cobertura simulada por WEPP de rastrojo y canopeo (%) bajo soja ajustada y sin ajustar, en 3 momentos del año, promedio del período 1980-2012.

	% cobertura por rastrojo		% cobertura del canopeo	
	Sin ajustar	Ajustada	Sin ajustar	Ajustada
30 Noviembre	14	27	8	6
30 Diciembre	11	21	73	53
28 Febrero	73	15	12	99

La cobertura por rastrojo entre surcos y la cobertura por biomasa de ambas sojas tomaron formas distintas generando diferencias no sólo en la magnitud sino también en los momentos en que se producen los eventos erosivos. Uno de los factores que fue modificado en mayor medida fue la suma térmica de la estación de crecimiento, ya que si bien se introduce fecha de siembra y cosecha, dentro de ese período alcanzará antes o después la madurez fisiológica, y esta determinará el largo del ciclo. Esto trae aparejado el momento en que la cobertura por rastrojo del suelo es mínima, y pocos días después se hace máxima por la caída de las hojas. Por lo que esta variable determina a partir de qué momento el suelo comienza a estar cubierto por rastrojo, así como afectará la cantidad de materia seca del rastrojo.

Como se observa en la figura 7, el mes de mayor pérdida de suelo para la soja ajustada fue febrero, el cual coincide con el mes de mayores precipitaciones promedio para esta serie de años y de elevada intensidad. A fines de este mes la soja ajustada presenta una cobertura por biomasa casi del 100%, pero una muy baja cobertura a nivel de suelo por rastrojo. Situación que fue representada con el círculo rojo en la figura 9 sector izquierdo. La soja sin ajustar, durante este período alcanza su madurez fisiológica y comienza la caída de hojas, aumentando la cobertura entre surcos hasta alcanzar su máximo en este mes (ver cuadro 6) e inversamente disminuye la cobertura por biomasa, lo que fue representado por el rombo azul en la misma figura. Según

Wischmeier y Smith (1978), esta diferencia en cobertura por biomasa y por rastrojo, se ubica en torno al 5% (figura 9, izquierda), WEPP simula aproximadamente un 50% más. Por lo que se deduce que es altamente sensible a la altura de regoteo.

La máxima pérdida de suelo de la soja sin ajustar se simula en los meses de noviembre y diciembre (ver figura 7), en los que se da una combinación de elevadas precipitaciones e intensidad. La diferencia con la soja ajustada radica en la cobertura por rastrojo, que, siendo muy baja en ambos casos, en la soja ajustada (punto rojo en figura 9, derecha) es casi un 50% mayor que en la soja sin ajustar (rombo azul en figura 9, derecha). Según Wischmeier y Smith (1978) citados por García Préchac (1992) se espera casi un 20% más de erosión relativa en el caso de la soja sin ajustar (ver figura 9, derecha). Sin embargo, WEPP estima para noviembre un total de 52 y 21 toneladas de pérdida de suelo para la soja sin ajustar y ajustada respectivamente, siendo esta diferencia del 60%, lejos del 20% reportado.

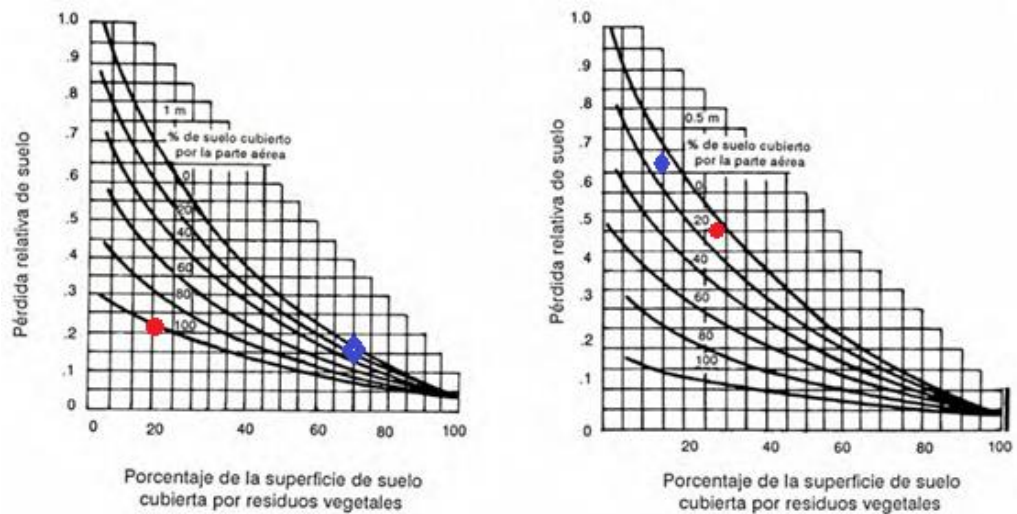


Figura 9. Efecto combinado de cobertura de la parte aérea de la vegetación y de residuos vegetales sobre superficie, en las pérdidas de suelo, a dos alturas de caída de las gotas sobre las hojas, 1 m (izquierda) y 0,5 m (derecha) (Wischmeier y Smith, 1978).

### 3.3.3. Análisis de las estimaciones de WEPP durante el cultivo

Una vez realizado el ajuste de los parámetros de crecimiento del cultivo, WEPP simula la mayor parte de la erosión de noviembre a marzo. Sin embargo, los datos de las parcelas de escurrimiento muestran que la erosión en las parcelas con vegetación casi se anula durante el verano (Durán y García Préchac, 2007).

El escurrimiento promedio para los últimos 4 años (2009-2012), simulados por WEPP es de 244,7 mm (soja ajustada), mientras que el mismo fue de 70,9 mm promedio en la parcela de escurrimiento que presentó valores más elevados de escurrimiento, bajo la misma rotación y tipo de suelo. Esta sobreestimación del escurrimiento que realiza el modelo ya fue constatada por Jorge (2012) cuando realizó el ajuste, así como cuando comparó con el escurrimiento de algunos eventos en La Estanzuela. Si bien en este caso no se cuenta con información de la erosión producida, del trabajo de ajuste de Jorge (2012) se desprende que este escurrimiento no contiene sedimentos, ya que es asociado a subestimaciones de las pérdidas de suelo.

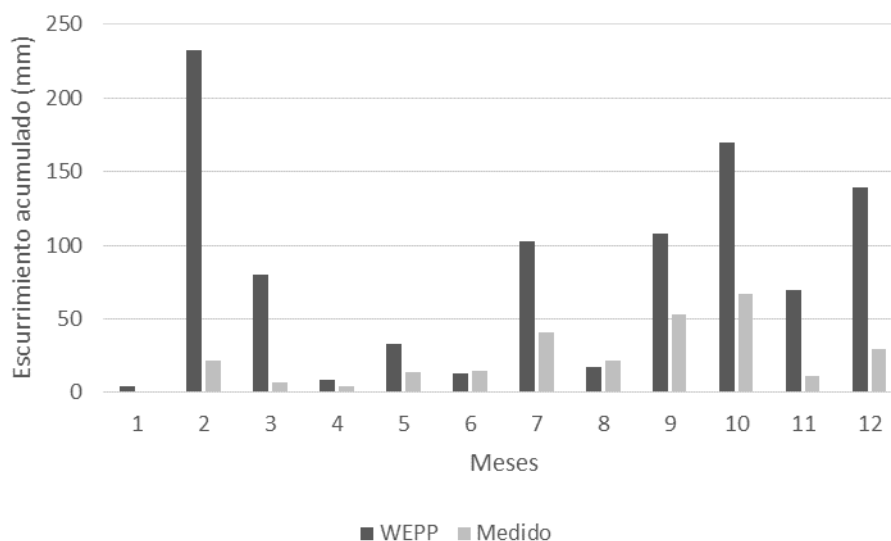


Figura 10. Esgurrimiento mensual acumulado estimado por WEPP y medido en la parcela entre 2009 y 2012.



Si bien se observa en la figura 10 que el escurrimiento simulado se ordena de igual manera que el medido, la magnitud de las diferencias (sobre todo en los meses de febrero, octubre y diciembre) alcanza los 210 mm acumulados en 4 años.

Cuando se estimaron las diferencias para cada año se observó que meses de precipitaciones por encima de la media, generaban las sobrestimaciones más importantes, como se describe en la figura 11.

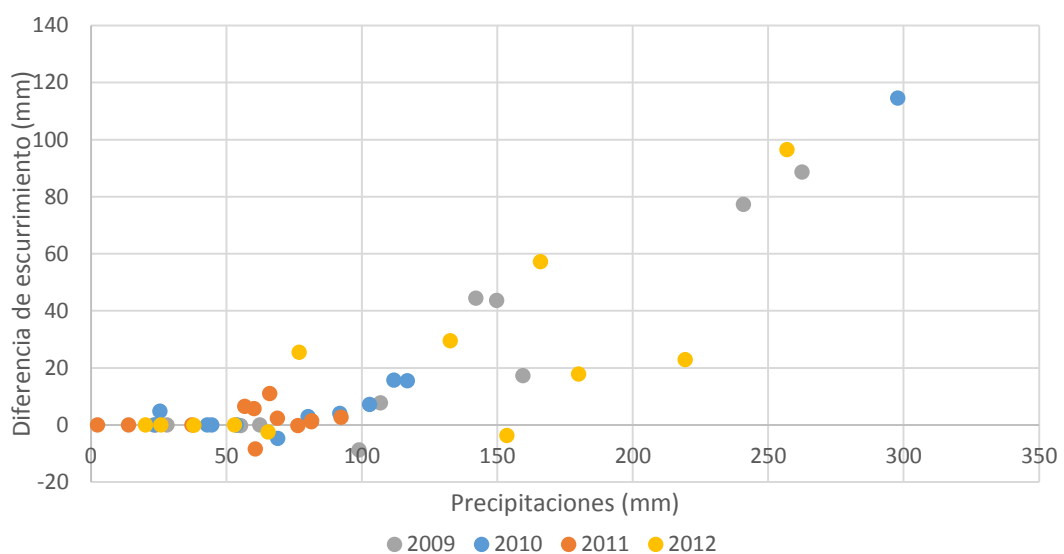


Figura 11. Diferencia en escurrimiento entre lo medido y lo simulado mensualmente según las precipitaciones ocurridas, para 2009, 2010, 2011 y 2012.

Solo en 10 de las 48 comparaciones las diferencias entre lo medido y lo simulado fueron mayores a 20 mm de escurrimiento. Sin embargo, son estos eventos los que pueden explicar la mayor parte de la erosión. De estos 10 casos, en 9, las precipitaciones correspondientes a esos meses fueron mayores a 130 mm, siendo mayor la diferencia cuanto más abundantes las precipitaciones ocurridas. Esto ocurrió de manera indistinta en cualquier época del año que se diera esta condición (4 casos ocurrieron durante el barbecho y 5 casos durante el cultivo). Los coeficientes de escurrimiento para estos casos fueron entre 27 y 47% para los simulados y menores de 13% los medidos.

Jorge (2012) sugiere que una causa posible de la sobreestimación del escurrimiento podría deberse al agrietamiento de los suelos luego de períodos de sequía, el cual genera un aumento drástico en la tasa de infiltración, fenómeno que el modelo no es capaz de simular. Por este motivo, se contrastaron las situaciones en que el modelo no ajusta con los mapas de contenido de agua disponible del suelo (INIA Gras, 2017), no hallándose relación entre las mismas y periodos posteriores a una seca. Solo se pudo establecer esta conexión en febrero 2009, cuando no solo enero fue muy seco con posibilidad de rajaduras en el suelo, sino que las precipitaciones fueron superiores a 250 mm en el mes.

En la figura 12 se presentan los eventos de escurrimiento simulados y medidos respecto de las precipitaciones registradas, correspondientes a los 9 meses dónde se registró una diferencia de escurrimiento mayor a 20 mm (ver figura 11).

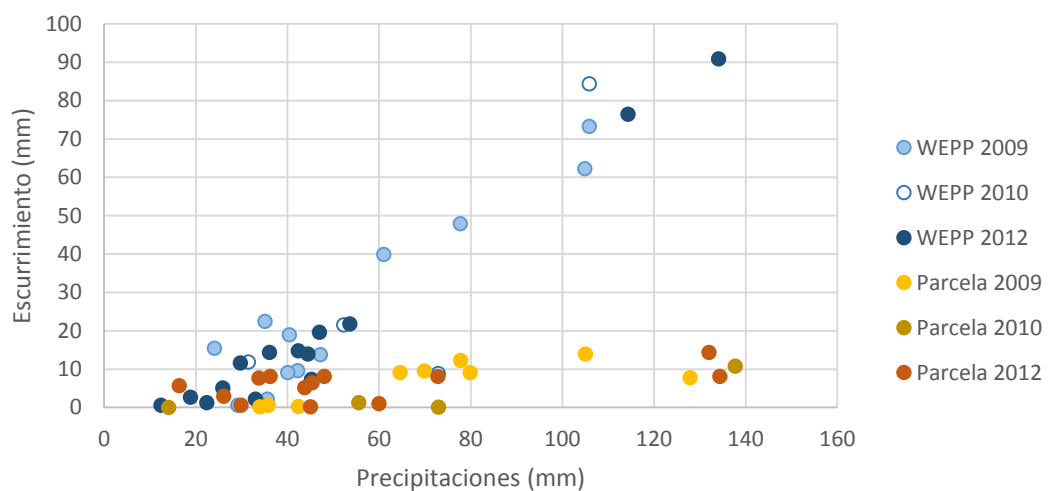


Figura 12. Ecurrimiento simulado y medido respecto a las precipitaciones, de los años 2009, 2010 y 2012.

En la parcela de escurrimiento, no importa cuánto llueva por evento individual, el escurrimiento nunca supera los 20 mm, siendo el máximo coeficiente de escurrimiento 35%. WEPP en cambio, simula más escurrimiento a mayores

precipitaciones, alcanzando valores de coeficiente de escurrimiento del orden del 80%.

### 3.3.4. Análisis de las estimaciones de WEPP en el barbecho

En los registros de la parcela de escurrimiento de La Estanzuela, el 26% del escurrimiento se produce en presencia del cultivo de soja, y el restante 74% se produce durante el barbecho. En cambio WEPP para ese período estima un 55% de escurrimiento durante el cultivo asociado al 74% de la erosión estimada y un 45% durante período de barbecho, asociado al 26% de la erosión. La misma tendencia es estimada en el período 1980-2012 (20% y 80% de pérdida de suelo durante el barbecho y el cultivo respectivamente).

Una de las variables más importantes en determinar la erosión durante los meses de barbecho es la cobertura del suelo, por lo que el cuadro 7 presenta las estimaciones del modelo WEPP.

Cuadro 7. Cobertura entre surcos (%) y cantidad de rastrojo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) a cosecha (1/5) y previo a la siembra (30/10) promedio de los 33 años, para soja ajustada y sin ajustar.

	% de cobertura		$\text{Kg ha}^{-1}$ de rastrojo	
	Sin ajustar	Ajustada	Sin ajustar	Ajustada
Poscosecha (1/5)	62	90	1785	4254
Presiembra (30/10)	32	59	700	1656

La tasa de descomposición del rastrojo para la soja ajustada promedio para los 33 años es algo superior ( $14,2 \text{ kg ha}^{-1}\text{día}^{-1}$ ) respecto a la encontrada en la bibliografía regional,  $13,3 \text{ kg ha}^{-1}\text{día}^{-1}$  (Richmond y Rillo, 2007). Si bien la tasa de degradación media diaria depende de múltiples factores, se estima que en el primer invierno se degrada un 50% aproximadamente. En el caso citado por Richmond y Rillo (2007) la

soja de primera partió de 4137 kg ha<sup>-1</sup> de rastrojo y se degradó en un 52%. Alvarez *et al.* (1991) obtuvieron resultados similares para la descomposición de rastrojo de soja en superficie, en Pergamino Argentina. En el caso en que se ajustan las variables, el rastrojo simulado es de 4254 kg ha<sup>-1</sup>, y se alcanzaría en torno a un 60% de su descomposición a la siembra de la soja siguiente. Por lo que puede concluirse, que los valores en términos de kilogramos de MS del rastrojo por hectárea no se encuentran alejados de los valores publicados.

Por el contrario cuando no se ajustó ningún parámetro del cultivo, se partió del 40% de cantidad de rastrojo, y se logró también en torno a un 60% de degradación, siendo la tasa de descomposición 5,9 kg ha<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup>.

No se cuenta con datos nacionales publicados que relacionen cobertura del suelo por rastrojo y kilos de materia seca del mismo para la rotación soja continua. El único antecedente nacional recabado relacionando ambas variables para este cultivo es información generada por Ferreira y Ferreira (2016), de la cual se presenta una selección en el cuadro 8. Los datos fueron recolectados en chacras comerciales. Cuando se midió la cobertura no se separó según su origen, por lo que se trata de la materia seca y cobertura de todos los cultivos hasta ese momento. Los kilos de rendimiento no se encuentran en todos los casos corregidos por humedad.

Cuadro 8. Secuencia de cultivos asociado a sus rendimientos y determinación de materia seca (kg ha<sup>-1</sup>) y cobertura (%) del rastrojo (Ferreira y Ferreira, 2016).

Ver.	Rinde (kg ha <sup>-1</sup> )	Inv.	Rinde (kg ha <sup>-1</sup> )	Ver.	Rinde (kg ha <sup>-1</sup> )	Inv.	% cob	MS (kg ha <sup>-1</sup> )	Ver.
		Canola	500	Soja 2 <sup>a</sup>	600	BQ	11	700	Soja 1 <sup>a</sup>
		Canola	2100	Soja 2 <sup>a</sup>	3600	BQ	41	3813	Soja 1 <sup>a</sup>
Maíz	7714	BQ		Soja 1 <sup>a</sup>	3099	BQ	27	2800	Maíz
		Trigo	3845	Soja 2 <sup>a</sup>	1885	BQ	62	6256	Maíz

Nota: Ver: verano, Inv.: invierno, % cob: % de cobertura, MS: materia seca, BQ: barbecho químico

Si bien los datos son de situaciones muy puntuales y mezclando diferentes tipos de rastrojos, puede observarse que la relación entre kilos de MS de rastrojo y porcentaje de cobertura son muy diferentes que los resultados obtenidos por el modelo. Es muy probable que WEPP esté tomando valores de cobertura del suelo mayores por kilogramo de rastrojo sobre la superficie, tal como se mencionara en la introducción, en referencia a la ecuación [4] (Gregory, 1982).

No se modificó dicho valor porque no se cuenta con información nacional para poder hacerlo. Pero cuando se corroboró la sensibilidad (ver cuadro 2 en anexo 6.3) de dicho parámetro se constató que su impacto respecto a los demás parámetros testeados, estuvo dentro de los 5 principales sobre la erosión. Esto coincide con lo expuesto por Flanagan *et al.* (2012) quienes también lo destacan como un parámetro cultivo-específico a ser ajustado. Cuando se corrió el modelo variando únicamente este coeficiente, se observó una diferencia de más de  $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  de pérdida de suelo, siendo mayor (erosión promedio anual de  $10,37 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ) cuando se utilizó el factor propuesto en la bibliografía igual a  $2 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$  de rastrojo de soja correspondiente al área que ocupan los tallos de soja, y menor ( $5,87 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  de erosión promedio anual) cuando se utilizó el coeficiente utilizado por defecto por WEPP de  $5,2 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$  de rastrojo. Este último como fuera aclarado en la introducción se ubica dentro del rango propuesto para rastrojo de soja inmediato a la cosecha, es decir que incluye hojas y tallos.

#### 4. CONCLUSIONES

Cuando se utilizó WEPP como herramienta para la estimación de pérdida de suelos en el largo plazo sin ajustar a las condiciones locales, se observaron evidentes diferencias con las estimaciones generadas por USLE, tanto en los valores absolutos como en la manera de ordenar el nivel de riesgo de cada sistema simulado.

En los sitios donde las variables esfuerzo cortante crítico y conductividad hidráulica efectiva del suelo se encuentran ajustadas en WEPP, se observó que el factor C estimado por Erosión 6.0 fue aproximadamente cuatro veces superior que el estimado por WEPP. Esto generó grandes diferencias en la estimación de erosión sobre el sistema ubicado en el suelo Argisol subéutrico de la unidad Alférez. No así, en el suelo Brunosol éutrico típico de la unidad Ecilda-Paullier, ya que en este caso WEPP consideró al suelo como más erodable, compensando así las diferencias producidas por el factor cobertura.

El ajuste de los parámetros de crecimiento del cultivo resulta importante en la estimación de erosión en el largo plazo con WEPP. A su vez, modifica los momentos en que se alcanzan los picos de cobertura por biomasa y rastrojo, afectando directamente los momentos en que se producen el escurrimiento y la erosión.

Aun modificando parámetros de crecimiento del cultivo, WEPP sobreestima escurrimiento fundamentalmente cuando las precipitaciones superan los 130 mm mensuales, indistintamente de la época del año en que se produce.

WEPP estimó que el 20% de la erosión total anual se produce durante los meses de barbecho. Es posible que uno de los factores que incide en ello sea el coeficiente utilizado por el modelo para convertir kilos de materia seca de rastrojo en porcentaje de cobertura, demasiado elevado, por lo que sobreestima el nivel de cobertura del suelo por rastrojo.

Este trabajo remarca la necesidad de profundizar los estudios que permitan estimaciones más ajustadas de este modelo, y ampliar el rango de situaciones pasibles

de ser simuladas. Respecto a las variables edáficas, sería de utilidad obtener valores de esfuerzo cortante crítico y conductividad hidráulica efectiva para diferentes suelos, ya que los sitios donde se realizaron los ajustes de las mismas fueron solamente dos (donde se obtuvieron registros de sedimentos), y estas constituyen variables reportadas como sensibles para este modelo. Por otra parte, se destaca la importancia de ajustar los parámetros de crecimiento de aquellos cultivos más sembrados en el país, de manera que la curva de crecimiento ajuste a nuestras condiciones, así como verificar que la tasa de degradación de dicho rastrojo también resulte acorde. Surge, a su vez, la necesidad de evaluar qué valor relaciona mejor kilos de rastrojo del cultivo de soja en superficie y área de cobertura que genera, a lo largo de su degradación, en condiciones locales. Sería interesante a su vez, evaluar en detalle la sensibilidad de WEPP a la altura de regoteo, ya que generó diferencias importantes en la estimación de erosión respecto a lo estimado según la bibliografía. Por último, se pone de manifiesto, que si bien es posible seguir mejorando las estimaciones del modelo a partir de un conjunto de estudios particulares, idealmente sería bueno contar con el registro de sedimentos y volumen de escurrimiento a partir de rotaciones frecuentemente utilizadas en el país, de manera que pueda incrementarse la precisión de los ajustes.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Abal G, D'Angelo M, Cataldo J, Gutiérrez Arce A. 2011. Mapa solar del Uruguay: versión 1.0: memoria técnica. Montevideo: Ediciones Universitarias. 57.

Allen RG. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. 322.

Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Tomo III: Descripción de las unidades de suelos. Montevideo: Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. 452.

Alvarez R, Daniel P, Santanatoglia O, Brazzola G, Garcia R. 1991. Descomposición de rastrojo de soja en bolsas de residuos de distinto tamaño de poro. Turrialba, 41 (3): 279-284.

Amorim RS, Da Silva DD, Pruski FF, Matos ATD. 2010. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. Engenharia Agrícola, 30 (6): 1046-1059.

Amundson R, Berhe AA, Hopmans JW, Olson C, Sztein AE, Sparks DL. 2015. Soil and human security in the 21st century. Science, 348 (6235): 647-654.

Arnold J, Weltz M, Alberts E, Flanagan D. 1995. Plant growth component (Chapter 8). En: Flanagan DC, Nearing MA. (Eds.). Technical Documentation: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP). West Lafayette: National Soil Erosion Research Laboratory (10).

Bagarello V, Ferro V, Giordano G, Mannocchi F, Todisco F, Vergni L. 2013. Predicting event soil loss from bare plots at two Italian sites. Catena, 109: 96-102.

Bagarello V, Ferro V. 2012. Testing the "physical model concept" by soil loss data measured in Sicily. Catena, 95: 1-5.

Bazzoffi P. 2009. Soil erosion tolerance and water runoff control: minimum environmental standards. Regional Environmental Change, 9 (3): 169-179.



Berc J, Lawford R, Bruce J, Mearns L, Easterling D. 2003. Conservation Implications of Climate Change: Soil Erosion and Runoff from Croplands: A Report from the Soil and Water Conservation Society. Ankeny: Soil and Water Conservation Society. 25.

Boardman J. 2006. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. *Catena*, 68 (2): 73-86.

Castaño JP, Giménez A, Ceroni M, Furest J, Aunchayna R, Bidegain M. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. Montevideo: INIA. (Serie técnica; 193). 34.

Chartier MP, Rostagno CM. 2010. Evaluación del modelo WEPP para predecir la erosión hídrica en pastizales semiáridos del noreste de la Patagonia. *Ciencia del suelo*, 28 (1): 91-103.

DIEA. (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2013. Producción [En línea]. Consultado 10 abril 2014. En: Anuario estadístico agropecuario 2013. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). Disponible en: <http://www2.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-anuario-2013,O,es,0>.

DNM. (Dirección Nacional de Meteorología) Servicio de Dirección de Climatología y Documentación. Bases de datos climáticas Paysandú y Durazno. [Datos enviado por e-mail]. 23 setiembre 2013.

Dotterweich M. 2013. The history of human-induced soil erosion: geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation—a global synopsis. *Geomorphology*, 201: 1-34.

Durán A, García Préchac F. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo: Hemisferio Sur. 692.

Edwards W, Owens L. 1991. Large storm effects on total soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46 (1): 75-78.

EEMAC. (Estación Experimental Mario A. Cassinoni). Servicio estación meteorológica [Datos enviado por e-mail]. 23 setiembre 2013.

Ernst O, Mazzilli S, Kemanian A. 2013. Zonas agrícolas en expansión: desarrollo de herramientas para un manejo sustentable de los sistemas de producción. Montevideo: INIA. (Serie de difusión; 50). 32.

Evans R, Collins A, Foster ID, Rickson R, Anthony S, Brewer T, Deeks L, Newell-Price J, Truckell I, Zhang Y. 2015. Extent, frequency and rate of water erosion of arable land in Britain—benefits and challenges for modelling. *Soil Use and Management*, 32 (S1): 149-161.

Ferreira AL, Ferreira S. 2016. Cobertura del suelo por rastrojo a la siembra de soja para diferentes secuencias de cultivos. Montevideo. Universidad de la República. 63.

Flanagan D, Frankenberger J, Ascough J. 2012. WEPP: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55 (4): 1463-1477.

Flanagan D, Nearing M. 1995. Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. West Lafayette: National Soil Erosion Research Laboratory (Report 10).

Foster G, Young R, Römkens M, Onstad C. 1985. Processes of soil erosion by water. En: Follet RF, Stewart BA. (Eds). *Soil erosion and crop productivity*. Madison: ASA, CSSA, SSSA: 137-162.

Furl C, Sharif H, Jeong J. 2015. Analysis and simulation of large erosion events at central Texas unit source watersheds. *Journal of Hydrology*, 527: 494-504.

García Préchac F. 2013. ¿Qué responsabilidad tienen las actividades agropecuarias en la contaminación de las aguas del Río Santa Lucía? [En línea]. 1 octubre 2015. <http://www.fagro.edu.uy/index.php/documentos/category/44-expo-prado-2013?download=324:qu-responsabilidad-tienen-las-actividades-agropecuarias-en-la-contaminacin-de-las-aguas-del-ro-santa-luca>.

García Préchac F, Hill Lavista M, Clérico C, Hill E. 2009. EROSION 6.0. p. Programa de computación para el uso de la USLE/RUSLE en la Región Sur de la Cuenca del Plata. Versión operativa en Windows 6.0 (Rel. 1.0.8).

García Préchac F. 1992. Guía para la toma de decisiones en conservación de suelos: 3a. aproximación. Montevideo: INIA. (Serie técnica; 26). 64.

Gonçalves FA. 2007. Validação do modelo WEPP na predição de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de Viçosa-MG. Tese doutorado. Minas Gerais, Brasil. Universidade Federal de Viçosa. 116 p.

Gregory JM. 1982. Soil cover prediction with various amounts and types of crop residue. Trans. ASAE, 25 (5): 1333-1337.

Hill M, Clérico C, Sánchez G, Kacevas A. 2015. Planes de uso y manejo de suelos: base de la política de conservación de suelos en Uruguay, a dos años de su implementación. En: IV Simposio Nacional de Agricultura. Paysandú, Uruguay (2015, Paysandú, Uruguay).

Hill M, García Prechac F, Terra J, Sawchik J. 2008. Incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo en el modelo USLE/RUSLE para estimar erosión en Uruguay. Agrociencia Uruguay, 12 (2): 57-67.

Huffman T, Liu J, Green M, Coote D, Li Z, Liu H, Liu T, Zhang X, Du Y. 2015. Improving and evaluating the soil cover indicator for agricultural land in Canada. Ecological Indicators, 48: 272-281.

INIA. (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2015. 2015: Año internacional de los suelos "Suelos sanos para una vida sana". Montevideo: INIA, 42: 1-68.

INIA. (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2013. Servicio [En línea]. 10 marzo 2013. <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>.

INIA Gras. 2017. Porcentaje de agua disponible por sección policial [En línea]. 1 marzo 2017. <http://www.inia.uy/gras/Monitoreo-Ambiental/Balance-H%C3%ADrico/Porcentaje-de-agua-disponible-por-secci%C3%B3n-policial>.

Jorge G. 2012. Evaluación del impacto de la intensificación del uso del suelo sobre la erosión hídrica en sistemas agrícolas del Uruguay: Aplicación del modelo WEPP. Tesis de maestría. Montevideo. Facultad de Ciencias, Universidad de la República. 145p.

Jorge G, Vázquez N, Pérez-Bidegain M, Terra J. 2011. Mejora de la estimación de la erosión de los suelos en Uruguay: Aplicación del Modelo WEPP en suelos con diferenciación textural. En: Escuela Latinoamericana de Física de Suelos (X, 2010, Lavras-Brasil). Física de Suelos clave para el manejo sostenible de los recursos agua y suelos. Lavras. Universidad de Lavras. 91-98.

Jury WA, Horton R. 2004. Soil physics. New Jersey: John Wiley & Sons. 370.

Kinnell P. 2010. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, 385 (1): 384-397.

Laflen JM, Flanagan DC, Engel BA. 2004. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 40 (2): 289-297.

Li L, Du S, Wu L, Liu G. 2009. An overview of soil loss tolerance. *Catena*, 78 (2): 93-99.

Logan T. 1977. Establishing soil loss and sediment yield limits for agricultural land. En: *Proceedings of the National Symposium on Soil Erosion and Sedimentation by Water (2nd, 1977, Chicago, Illinois)*. ASAE. 59-68

Nearing M, Nichols M, Stone J, Renard K, Simanton J. 2007. Sediment yields from unit-source semiarid watersheds at Walnut Gulch. *Water Resources Research*, 43 (6).

Nearing M. 2002. Toward a new definition of soil loss tolerance for the United States. En: *International Soil Conservation Organization Conference (2002, Beijing-China)*.

Nearing MA. 2000. Evaluating soil erosion models using measured plot data: accounting for variability in the data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25 (9): 1035-1043.

Nearing MA, Govers G, Norton LD. 1999. Variability in soil erosion data from replicated plots. *Soil Science Society of America Journal*, 63 (6): 1829-1835.

Nearing MA, Foster GR, Lane LJ, Finkner SC. 1989. A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. 32 (5).

Newman J, Kaleita A, Laflen J. 2010. Soil erosion hazard maps for corn stover management using National Resources Inventory data and the Water Erosion Prediction Project. *Journal of Soil and Water Conservation*, 65 (4): 211-222.

Nicks AD, Lane LJ, Gander GA. 1995. Weather generator. En: Flanagan DC, Nearing MAs (Eds.). Hillslope profile and watershed model documentation. West Lafayette: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. 2.1-2.22.

Pillans B. 1997. Soil development at snail's pace: evidence from a 6 Ma soil chronosequence on basalt in north Queensland, Australia. *Geoderma*, 80 (1-2): 117-128.

Puentes R. 1981. A framed for the use of de Universal Soil Loss Equation in Uruguay. Master of Science. Texas, Estados Unidos. Texas A&M University. 80 p.

Renard KG, Foster GR, Weesies G, McCool D, Yoder D. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: US Government Printing Office.

Renard KG, Freimund JR. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of hydrology*, 157 (1-4): 287-306.

Richmond PF, Rillo SN. 2007. Caracterización de la dinámica de incorporación de residuos de cosecha al suelo en un sistema agrícola en siembra directa en el centro-oeste de Buenos Aires. *Informaciones Agronómicas*, 43: 22-26.

Sawchik J, Siri G, Ayala W, Barrios E, Bustamante M, Ceriani M, Gutiérrez F, Mosqueira J, Otaño C, Pérez M. 2015. El sistema agrícola bajo amenaza:¿ qué aportan los cultivos de cobertura y/o las pasturas cortas? En: Simposio Nacional de Agricultura. (IV, 2015, Paysandú-Uruguay). 149-168

Schmidt B, Allmaras R, Mannering J, Papendick R. 1982. Determinants of soil loss tolerance. Madison: American Society of Agronomy. (ASA Special Publication; 45). 153.

Scotta E, Gvozdenovich J. 2014. Factores C para el modelo USLE. En: XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas" (2014, Bahía Blanca, Argentina).

Sloneker L, Moldenhauer W. 1977. Measuring the amounts of crop residue remaining after tillage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 32: 231-236.

Smith DD, Whitt D, Zingg AW, McCall A, Bell F. 1945. Investigations in erosion control and reclamation of eroded Shelby and related soils at the Conservation Experiment Station, Bethany, Mo., 1930-42. Washington DC: USDA (Technical Bulletin; 883). 184.

Sparovek G, Bacchi O, Schnug E, Ranieri S, De Maria I. 2000. Comparison of three water erosion prediction methods (137Cs, WEPP, USLE) in south-east Brazilian sugarcane production. *Journal of Agriculture in the Tropics and Subtropics*, 101 (2): 107-118.

Stöckle CO, Donatelli M, Nelson R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European journal of agronomy*, 18 (3): 289-307.

Stott D. 1991. RESMAN A tool for soil conservation education. *Journal of soil and water conservation*, 46 (5): 332-333.

Stroosnijder L. 2005. Measurement of erosion: Is it possible? *Catena*, 64 (2): 162-173.

Tiwari A, Risse L, Nearing M. 2000. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. *Transactions of the ASAE*, 43 (5): 1129-1135.

Toy TJ, Foster GR, Renard KG. 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control. New York: John Wiley & Sons. 338.

Uruguay XXI. Promoción de inversiones y exportaciones. 2016. Oportunidades de inversión. Agronegocios. Montevideo, Uruguay. 46

USDA. Agricultural Research Service. 2008. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2. Predicting Soil Erosion By Water: A Guide to Conservation Planning [En línea]. 1 enero 2017.

[http://fargo.nserl.purdue.edu/rusle2\\_dataweb/RUSLE2\\_Training\\_Slide\\_Set.htm](http://fargo.nserl.purdue.edu/rusle2_dataweb/RUSLE2_Training_Slide_Set.htm).

Verheijen FG, Jones RJ, Rickson R, Smith C. 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94 (1): 23-38.

Wakatsuki T, Rasyidin A. 1992. Rates of weathering and soil formation. *Geoderma*, 52 (3): 251-263.

Williams J. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 11 (5): 965-974.

Wischmeier WH, Smith DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. Hyattsville, Maryland: USDA, Science and Education Administration. 62.

## 6. ANEXOS

### 6.1. AJUSTE DE PARÁMETROS DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE SOJA EN WEPP

García Isabel<sup>1</sup>, Pérez Mario<sup>2</sup>

1- PDU Abordaje Holístico, CENUR Litoral Norte, UdelaR. Estación Experimental Mario A. Cassinoni. Ruta 3 km 363, 60000 Paysandú, Uruguay. Correo electrónico: isabelgarciacarriquiry@gmail.com

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

#### 6.1.1. Resumen

El objetivo planteado en este trabajo fue evaluar la importancia de ajustar los parámetros de crecimiento de un cultivo en la estimación de escurrimiento y erosión con Water Erosion Prediction Project (WEPP). Para ello se contrastaron tres curvas de crecimiento de soja continua durante el período 1980-2012, simulado en Colonia (Latitud -34,33, Longitud -57,69) sobre un Brunosol éutrico de la unidad Ecilda Paullier-Las Brujas, de configuración de pendiente plana, longitud 100 metros e inclinación 3,5. Una obtenida con Cropsyst (modelo calibrado para nuestro país), otra sugerida por defecto en el modelo WEPP (sin ajustar), y otra conformada a partir de esta última, a la que se modificaron aquellos parámetros sensibles de crecimiento del cultivo que coincidentemente hayan sido ajustados con Cropsyst para nuestro país. Se verificó que las mismas simularan rendimientos promedio de soja similar, entorno a los 3200 kg ha<sup>-1</sup>. Al ajustar los parámetros de crecimiento del cultivo de soja, WEPP generó una curva de producción de biomasa que se asemeja (excepto en años de deficiencias hídricas importantes) a la obtenida con Cropsyst, mejorando en un 59% el momento



en que se simula la madurez fisiológica, lo que impacta directamente en los momentos de máximos y mínimos de cobertura por rastrojo y biomasa del suelo. Las diferencias absolutas en el máximo de biomasa simulado se redujeron en 39% al ajustar los parámetros. Modificar únicamente los parámetros de crecimiento del cultivo generó en la simulación un 25% menos de estimación de pérdida de suelo por erosión y un 7% menos de escurrimiento.

**Palabras clave:** modelización, degradación de suelos

### 6.1.2. Summary

The objective of this work was to evaluate the importance of adjusting crop growth parameters in the estimation of runoff and erosion with WEPP. For this purpose, three continuous soybean growth curves during the period 1980-2012 were simulated in Colonia (Latitude -34.33, Longitude -57.69) on a Brunosol éutrico of Ecilda Paullier-Las Brujas unit, under a flat, 100 meters length, 3,5% slope. The first one was obtained with Cropsyst (locally calibrated model), another one was the suggested by default by WEPP model (unadjusted), and based on the latter, the last one, from which known sensitive crop growth parameters were modified. Average soybean yields being around 3200 kg ha<sup>-1</sup> were verified. By adjusting soybean growth parameters, WEPP generated a biomass curve production that resembles (except in water deficient years) to that obtained with Cropsyst, improving the physiological maturity date simulation in 59%. This directly impacts on the maximum and minimum moments of soil coverage by stubble and biomass. The absolute differences in the simulated biomass maximum were reduced by 39% when adjusting the parameters. Modifying only crop growth parameters simulate a 25% less soil loss estimate due to erosion and 7% less runoff.

**Keywords:** modeling, soil degradation

### 6.1.3. Introducción

El 87% del área de Uruguay que ha sufrido algún grado de erosión y degradación se ubica en los suelos con mayor potencial agrícola (INIA, 2015). Siendo la erosión hídrica de origen antrópico el principal problema asociado a la producción agropecuaria (Hill *et al.*, 2015; Sawchik *et al.*, 2015). El riesgo de pérdida de suelo por erosión hídrica está ligado al régimen de precipitaciones. Debido a que las mismas ocurren de manera concentrada, en un corto período de tiempo, la mayoría del proceso erosivo ocurre en intervalos muy cortos, como pueden ser unos pocos eventos (Edwards y Owens, 1991). El estudio de parcelas de escurrimiento, junto con otros, han brindado evidencia considerable sobre el efecto que las tormentas individuales generan en la estimación de erosión de largo plazo (Furl *et al.*, 2015). Si los eventos extremos son de hecho la fuerza dominante detrás de las estimaciones de erosión de largo plazo a nivel de cuenca, es necesario su reconocimiento en modelos de estimación de erosión para llegar a conclusiones razonables (Furl *et al.*, 2015). El reporte de Soil and Water Conservation Society (Berc *et al.*, 2003) propone identificar umbrales de erosión de suelos, escurrimiento o transporte de contaminantes cuyo daño en determinada frecuencia resulta inaceptable; identificar el momento crítico en el año en el que el ciclo agrícola presenta mayor riesgo de daño; determinar la probabilidad de ocurrencia de tormentas de suficiente intensidad como para causar daños que excedan los umbrales establecidos; y diseñar sistemas de conservación que sean protectores en momentos de elevada vulnerabilidad y durante eventos particulares. Para ello es necesario el uso de una herramienta que lo haga posible.

En 1985, el USDA inició el Water Erosion Prediction Project (WEPP) para “desarrollar una nueva generación de tecnología de estimación de la erosión hídrica...” (Nearing *et al.*, 1989). Este es un modelo de simulación continua, que predice pérdida de suelo y su deposición en lugar de pérdida de suelo promedio neta. WEPP (Nearing *et al.*, 1989) estima el desprendimiento de suelo producido por el impacto de las gotas de lluvia, escurrimiento superficial, y encauzado, utilizando las descripciones físicas de

la teoría de desprendimiento. El modelo también se nutre de sofisticadas descripciones climáticas, hidrológicas, crecimiento de cultivos, y manejo de la tierra.

En Uruguay, existen escasos antecedentes de uso de WEPP para estimar erosión. Jorge (2012) realizó un ajuste de los parámetros base de la conductividad hidráulica y del esfuerzo cortante crítico en dos sitios, con lo que obtuvo valores de escurrimiento medio anual y erosión anual media más cercanos a los medidos y a los resultados de erosión arrojados por USLE/RUSLE. Debido a que WEPP se basa en procesos, puede ser extrapolado a una gama más amplia de condiciones que pueden ser imprácticas o antieconómico para la prueba de campo (Flanagan y Nearing, 1995). Sin embargo existe bibliografía que recomienda realizar el ajuste de ciertos parámetros de este modelo para mejorar las estimaciones de pérdida de suelo (Tiwari *et al.*, 2000).

Más allá de los trabajos de ajuste y validación llevados a cabo en Uruguay con el modelo USLE/RUSLE, la base de datos experimental con la que se cuenta para ajustar y validar otros modelos es reducida. Una alternativa es estudiar cómo variables claves ajustadas para otros modelos en Uruguay afectan las estimaciones de erosión en WEPP. Laflen *et al.* (2004) afirman que el crecimiento de plantas y la generación de residuos y su destino, deben ser modelados razonablemente si se quieren obtener buenos resultados. En este marco se enfocó trabajo con WEPP principalmente sobre las variables del cultivo de soja (cultivo de mayor importancia económica de nuestro país) que demuestran tener más impacto sobre la pérdida de suelo por erosión (ya sea por la sensibilidad del modelo a este parámetro o por la magnitud del cambio), y aquellas sobre las cuales se podía obtener información local para modificarlo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la importancia de ajustar el simulador de crecimiento de cultivos utilizado por WEPP, aun cuando se trabaja con igual rendimiento de los cultivos, en la pérdida total de suelo por erosión y los momentos en que esta se produce.

#### 6.1.4. Materiales y métodos

La simulación se sitúa en el departamento de Colonia (Latitud -34,33, Longitud -57,69, Altura 72 metros). La base de datos climática empleada corresponde a los registros del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), comprendiendo el período 1980 al 2012 inclusive. El generador de clima empleado por WEPP, CLIGEN (Nicks *et al.*, 1995), requiere de la preparación de la información climática en archivos, que incluyen el promedio mensual, desvío estándar y en algunos casos el coeficiente de asimetría de las variables climáticas (precipitaciones, temperatura máxima y mínima, radiación solar, viento), así como la probabilidad de lluvia habiendo llovido o no el día anterior, el punto de rocío, la media máxima diaria de intensidad de precipitación en 30 minutos y el tiempo al pico de intensidad de lluvia. Estas dos últimas fueron tomadas Jorge (sin publicar).

La simulación se realizó sobre el suelo Brunosol éutrico típico de la unidad Ecilda Paullier-Las Brujas. La información de suelos requerida por WEPP incluye profundidad (mm), porcentaje de arena y arcilla, materia orgánica, y capacidad de intercambio catiónico ( $\text{meq } 100\text{gr}^{-1}$ ), por cada horizonte del perfil, fue tomada de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay Tomo III (Altamirano *et al.*, 1976). Se utilizaron los valores de esfuerzo cortante crítico (3 Pa) y conductividad hidráulica efectiva ( $6 \text{ mm h}^{-1}$ ) ajustados por Jorge (2012). Todas las simulaciones fueron realizadas con una inclinación de la pendiente de 3,5% un largo de 100 m y configuración plana.

Se evaluó en primera instancia la sensibilidad de los parámetros del componente cobertura mediante el coeficiente de sensibilidad “S” extraído de Chartier y Rostagno (2010) de acuerdo a la ecuación [10].

$$S = \frac{(R2-R1)/R12}{(Pe2-Pe1)/Pe12} \quad [10]$$

En la que, “R1” y “R2” son el valor más bajo y más alto en la respuesta del modelo (escurrimiento o erosión) para los valores más bajo y más alto de los parámetros de entrada (“Pe1” y “Pe2”), de cada variable analizada. “R12” es el promedio de los dos

resultados del modelo y “Pe12” es el promedio de “Pe1” y “Pe2”. El parámetro “S” representa un cambio relativo normalizado en las variables permitiendo de esta manera la comparación de las sensibilidades de los parámetros de entrada los cuales generalmente tienen distintos órdenes de magnitud (Nearing et al., 1990 citados por Chartier y Rostagno (2010)). Valores de S entorno a cero indicarían que el modelo es poco sensible a cambios en dicho parámetro. Valores positivos o negativos de S indicarían incrementos o disminuciones en la respuesta del modelo cuando se incrementa o disminuye el valor del parámetro de entrada respectivamente. El valor absoluto de S indicaría el grado del cambio o importancia de la sensibilidad.

Con información sobre la sensibilidad de los parámetros de crecimiento del cultivo (sub modelo de WEPP) y los parámetros conocidos de la calibración y validación del Cropsyst (Stöckle et al., 2003) en Uruguay (Ernst et al., 2013), se generaron los “parámetros del cultivo ajustado” para una soja continua, presentado en cuadro 1. Por otra parte, tal como lo sugieren Flanagan et al. (2012), se seleccionó del modelo WEPP el cultivo predeterminado “Soybeans- High Fertilization Level”, se constató que produjera igual rendimiento que la soja ajustada, (rendimiento que es probable para una soja de primera para esa zona del país) y se los denominó “parámetros del cultivo sin ajustar”. Se realizaron 3 simulaciones, una con el modelo Cropsyst, donde se simuló el crecimiento de una soja de grupo de madurez 5.9, sembrada el 1º de noviembre y cosechada el 30 de abril, cuyo rinde promedio para el período 1980-2012 con este modelo fue de aproximadamente 3200 kg ha<sup>-1</sup>. Las otras dos simulaciones fueron realizadas por el sub modelo de crecimiento del cultivo en WEPP, con los parámetros ajustados y sin ajustar. Se obtuvieron tres curvas de crecimiento de cultivo diferentes, las cuales se contrastaron entre sí. A su vez, se compararon las salidas de erosión estimadas con WEPP a partir de los archivos “ajustado” y “sin ajustar” del cultivo.

Cuadro 1. Parámetros del cultivo de soja, ajustados y sin ajustar.

Parámetros del modelo	Sin ajustar	Ajustada
*Relación biomasa energía (kg MJ <sup>-1</sup> )	25	20
Grados día a emergencia (°C d <sup>-1</sup> )	60	100
*Grados día en la estación de crecimiento (°C d <sup>-1</sup> )	1150	2500
Distancia entre plantas en la hilera (cm)	2,5	7,5
Altura del rastrojo en pie luego de cosecha (cm)	15,2	10
*Índice de cosecha (%)	50	40
*Temperatura base (°C)	10	5
*Temperatura óptima para el crecimiento (°C)	25	28
Máxima profundidad de raíces (cm)	100	140

\*Fueron los parámetros detectados como más sensibles del modelo.

Se empleó la versión 5.x de CLIGEN a los efectos de generar los archivos climáticos necesarios para llevar a cabo las simulaciones; y el componente de laderas de la versión WEPP 2012.8 con la interface para Windows.

#### 6.1.5. Resultados y discusión

En el cuadro 2 se presentan las fechas en que las tres simulaciones realizadas estiman la madurez fisiológica, momento a partir del cual comienza la caída de hojas en el cultivo de soja, y el valor promedio del máximo de biomasa producida. La diferencia promedio en días, registrada año a año es de 74 días entre lo que simuló Cropsyst y lo simulado sin ajustar en WEPP, y de 30 días respecto a la simulación ajustada.

Cuadro 2. Fecha promedio en que se produce madurez fisiológica y el promedio de máximo de biomasa alcanzado al utilizar los parámetros del cultivo por defecto con WEPP (sin ajustar), al ajustarlos y cuando la simulación fue realizada con Cropsyst.

	Sin ajustar	Ajustado	Cropsyst
<b>Fecha promedio de madurez fisiológica</b>	03/02	18/03	24/04
<b>Biomasa máxima producida (kg MS ha<sup>-1</sup>)</b>	6416	8694	8889

La diferencia absoluta en el pico máximo de producción de biomasa para cada año fue en promedio 2918 kg ha<sup>-1</sup> entre lo simulado por Cropsyst y lo simulado por WEPP sin ajuste previo de parámetros del cultivo. El ajuste de dichos parámetros permitió reducir a 1774 kg ha<sup>-1</sup> la diferencia absoluta de máxima producción de biomasa respecto a la simulación de Cropsyst, es decir que redujo la diferencia entre los máximos en un 39%. Sin embargo, se observó que en años en los que las precipitaciones durante el cultivo son menores a 450 mm, el ajuste de los parámetros del cultivo realizados en WEPP no refleja los niveles de producción de biomasa simulados con Cropsyst, como se presenta en la figura 1. Se clasificaron los años b como “déficit” aquellos en el que se registran precipitaciones menores a un desvío de la media, “normal” a los que presentaron precipitaciones dentro del rango de la media más-menos un desvío, y “superávit” los que registraron más de un desvío de precipitaciones.

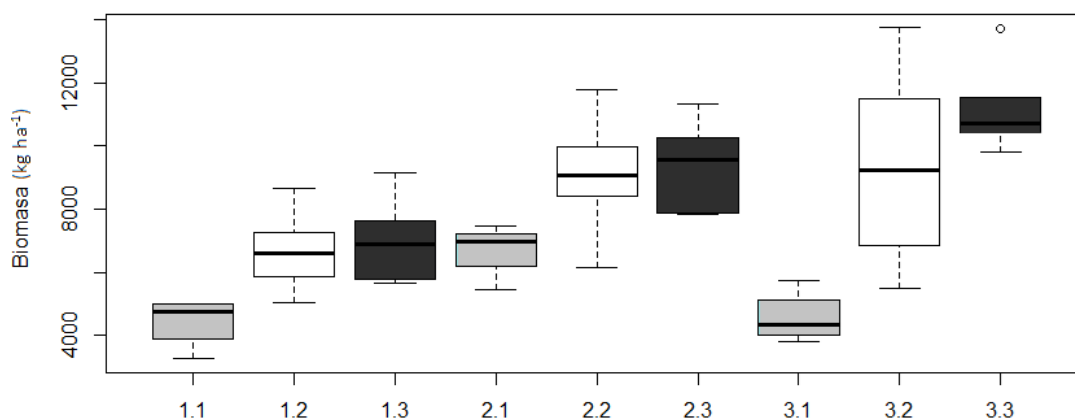


Figura 1. Máxima biomasa producida ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) según tipo de simulación: WEPP con parámetros sin ajustar y año déficit (1.1.), normal (1.2) y superávit (1.3); WEPP con parámetros ajustados y año déficit (2.1), normal (2.2) y superávit (2.3); Cropsyst y año déficit (3.1), normal (3.2) y superávit (3.3).

Si bien, en términos de estimación de erosión esto no genera problemas dado que son veranos con bajo o nulo escurrimiento, sí podrían acumularse diferencias en los niveles de rastrojo producidos y la cobertura a nivel del suelo a posteriori.

Los resultados de simulaciones de WEPP ajustando y sin ajustar los parámetros de crecimiento del cultivo se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Resultados de la simulación con WEPP utilizando los parámetros predeterminados “sin ajustar” y los “ajustados”.

	Sin ajustar	Ajustado
Precipitaciones (mm)	1129,1	1129,1
Escurrecimiento (mm)	281,85	262,84
Erosión ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	7,83	5,87
Rendimiento promedio de soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	3190	3260

La soja ajustada generó un 25% menos de erosión anual promedio del largo plazo que la soja de alta fertilización propuesta por WEPP, sin ajustar, y un 7% menos de escurrimiento. Diferencia que se explica en la figura 2, por los momentos en que



un cultivo y otro alcanzan los máximos y mínimos niveles de cobertura, ya sea por rastrojo, o por parte aérea.

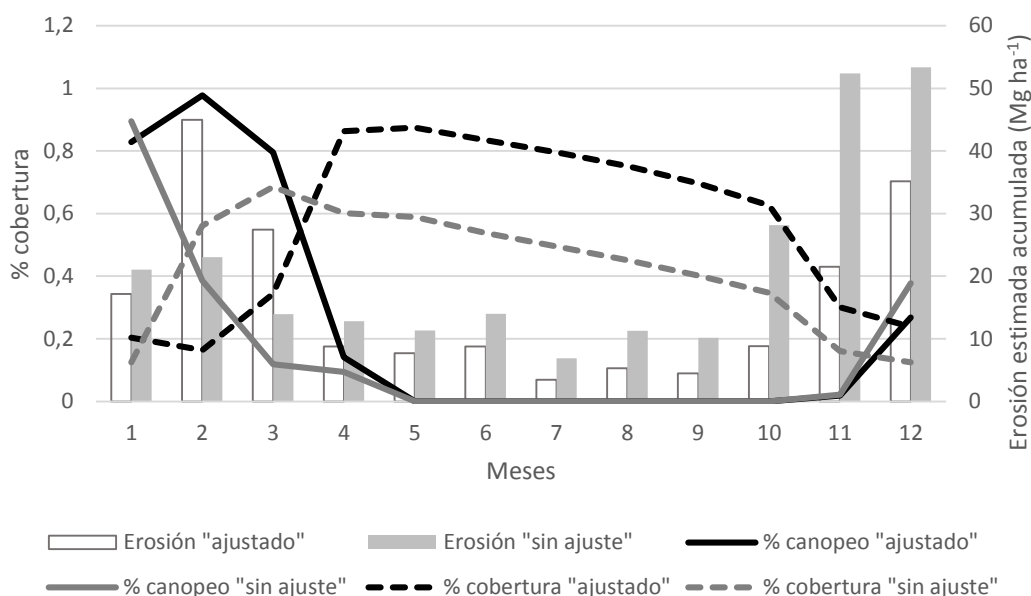


Figura 2. Evolución promedio mensual del período 1980-2012 de las variables cobertura por canopeo, cobertura por rastrojo, y erosión acumulada mensual (Mg ha<sup>-1</sup>) para el cultivo ajustado en sus parámetros de crecimiento y el no ajustado o predeterminado de WEPP.

Según Wischmeier y Smith (1978), la diferencia en cobertura por biomasa y por rastrojo simuladas en el mes de febrero, generarían una diferencia en torno a 5% de erosión. Sin embargo, WEPP simula aproximadamente un 50% más en el cultivo simulado con ajuste en sus parámetros, por lo que se deduce que WEPP es altamente sensible a la altura de regoteo.

La máxima pérdida de suelo simulada bajo el cultivo de soja sin ajustar se produce en los meses de noviembre y diciembre, siendo que la cobertura por rastrojo es muy baja en ambos casos, en la soja ajustada es casi un 50% mayor que en la soja sin ajustar. Según (Wischmeier y Smith (1978)) se espera aproximadamente un 20% más de erosión relativa en el caso de la soja sin ajustar. Sin embargo, WEPP estima

para noviembre un total acumulado de 52 y 21 Mg de pérdida de suelo bajo la soja sin ajustar y ajustada respectivamente, siendo esta diferencia del 60%.

#### **6.1.6. Conclusiones**

Ajustar los parámetros de crecimiento del cultivo resulta importante en la estimación de erosión en el largo plazo. A su vez, modifica los momentos en que se alcanzan los picos de cobertura por biomasa y rastrojo, afectando los momentos que se producen el escurrimiento y la erosión.

#### **6.1.7. Bibliografía**

- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Tomo III: Descripción de las unidades de suelos. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Montevideo, Uruguay.
- Berc J, Lawford R, Bruce J, Mearns L, Easterling D. 2003. Conservation Implications of Climate Change: Soil Erosion and Runoff from Croplands: A Report from the Soil and Water Conservation Society. Ankeny: Soil and Water Conservation Society. 25.
- Chartier MP, Rostagno CM. 2010. Evaluación del modelo WEPP para predecir la erosión hídrica en pastizales semiáridos del noreste de la Patagonia. Ciencia del suelo, 28 (1): 91-103.
- Edwards W, Owens L. 1991. Large storm effects on total soil erosion. Journal of Soil and Water Conservation, 46 (1): 75-78.
- Ernst O, Mazzilli S, Kemanian A. 2013. Zonas agrícolas en expansión: desarrollo de herramientas para un manejo sustentable de los sistemas de producción. Montevideo: INIA. (Serie de difusión; 50). 32.

- Flanagan D, Frankenberger J, Ascough J. 2012. WEPP: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55 (4): 1463-1477.
- Flanagan D, Nearing M. 1995. Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. Report 10. US. Department of Agriculture (USDA) -Agricultural Research Service, NSERL, West Lafayette, IN.
- Furl C, Sharif H, Jeong J. 2015. Analysis and simulation of large erosion events at central Texas unit source watersheds. *Journal of Hydrology*, 527: 494-504.
- Hill M, Clérici C, Sánchez G, Kacevas A. 2015. Planes de uso y manejo de suelos: base de la política de conservación de suelos en Uruguay, a dos años de su implementación. En: IV Simposio Nacional de Agricultura. Paysandú, Uruguay (2015, Paysandú, Uruguay).
- INIA. (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2015. 2015: Año internacional de los suelos "Suelos sanos para una vida sana". Montevideo: INIA, 42: 1-68.
- Jorge G. 2012. Evaluación del impacto de la intensificación del uso del suelo sobre la erosión hídrica en sistemas agrícolas del Uruguay: Aplicación del modelo WEPP. Tesis de maestría. Montevideo. Facultad de Ciencias, Universidad de la República. 145p.
- Laflen JM, Flanagan DC, Engel BA. 2004. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 40 (2): 289-297.
- Nearing MA, Foster GR, Lane LJ, Finkner SC. 1989. A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. 32 (5).
- Nicks AD, Lane LJ, Gander GA. 1995. Weather generator. En: Flanagan DC, Nearing MAs (Eds.). Hillslope profile and watershed model documentation. West Lafayette: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. 2.1-2.22
- Sawchik J, Siri G, Ayala W, Barrios E, Bustamante M, Ceriani M, Gutiérrez F, Mosqueira J, Otaño C, Pérez M. 2015. El sistema agrícola bajo amenaza: ¿qué aportan los

cultivos de cobertura y/o las pasturas cortas? En: Simposio Nacional de Agricultura. (IV, 2015, Paysandú-Uruguay). 149-168.

Stöckle CO, Donatelli M, Nelson R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. European journal of agronomy, 18 (3): 289-307.

Tiwari A, Risse L, Nearing M. 2000. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. Transactions of the ASAE, 43 (5): 1129-1135.

Wischmeier WH, Smith DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. USDA, Science and Education Administration. Hyattsville, Maryland. 62.

## 6.2. EXTENSIÓN Y ORIGEN DE LOS REGISTROS CLIMÁTICOS

	Precipitación Acumulada (mm)	Radiación Solar por Heliofanía (cal cm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	Temperatura Máxima (°C) Y Mínima (°C)	Viento (2m km <sup>-1</sup> 24hs <sup>-1</sup> )
<b>Colonia</b>	INIA 1980-2012	INIA 1980-2012	INIA 1980-2012	INIA 1980-2012
<b>Salto</b>	INIA 1980-2012	INIA 1980-2012	INIA 1980-2012	INIA 1980-2012
<b>Tacuarembó</b>	INIA 1980-2012	INIA 1982-2012	INIA 1982-2012	INIA 1986-2012
<b>Treinta y Tres</b>	INIA 1980-2012	INIA 1980-2012	INIA 1980-2012	INIA 1980-2012
<b>Paysandú</b>	DNM 1980-2012	EEMAC 2002-2012	DNM 1980-2012	EEMAC 2002-2012
<b>Durazno</b>	DNM 1980-2012	Horas de sol DNM 1999-2005 y 2009- 2012	DNM 1980-2012	-

### 6.3. FACTOR C DE LAS ROTACIONES UTILIZADAS EN EROSIÓN 6.0

Rotación		Factor C
J.Pedro Varela	S-Cob-S-Cob-S-PP1-PP2-PP3	0,040
Alferez	S-Cob-S-Cob-S-Cob-SG-Cob	0,044
La Carolina	S-T-S-Cob-M-BQ	0,042
Trinidad	S-T-S-Cob-SG-PP1-PP2-PP3	0,035
Young	C-S-T-SG-BQ-S-T-S-Cob-S	0,068
Chapicuy	C-S-T-SG-BQ-S-T-S-Cob-S-PP1	0,055
Itapebi 3 árboles	C-S-T-SG-BQ-S-T-S-Cob-S	0,071
Ecilda Paullier LB	S-T-S-BQ-M-BQ cob	0,093
La Carolina	S-T-S-Cob-S-T-M-BQ	0,072
Paso Cohelo	S-Cob	0,085
Pueblo del Barro	S-Cob-S-T-SG-BQ	0,072

### 6.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO

Parámetros	Soja Sin Ajustar	test	S absoluto	Diferencia erosión
Índice biomasa/energía (kg MJ <sup>-1</sup> )	25,0	20	2,40	5,7
Temperatura óptima para el crecimiento(°C)	25,0	28	1,40	1,35
Temperatura base del aire diaria (°C)	10,0	5	0,99	7,75
Índice de cosecha (%)	50,0	40	0,69	1,11
Parámetro cobertura por rastrojo (m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> )	5,2	2	0,68	6,84
Suma térmica de la estación de crecimiento (°C d <sup>-1</sup> )	1150,0	2500	0,64	3
Máxima profundidad de raíces (cm)	100,0	140	0,24	0,6
Suma térmica a emergencia (°C d <sup>-1</sup> )	60,0	100	0,06	0,23
Altura del rastrojo post-cosecha (cm)	15,2	10	0,00	0,01
Espaciamento de plantas en la hilera (cm)	2,5	7,5	0,00	0,01

## 6.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

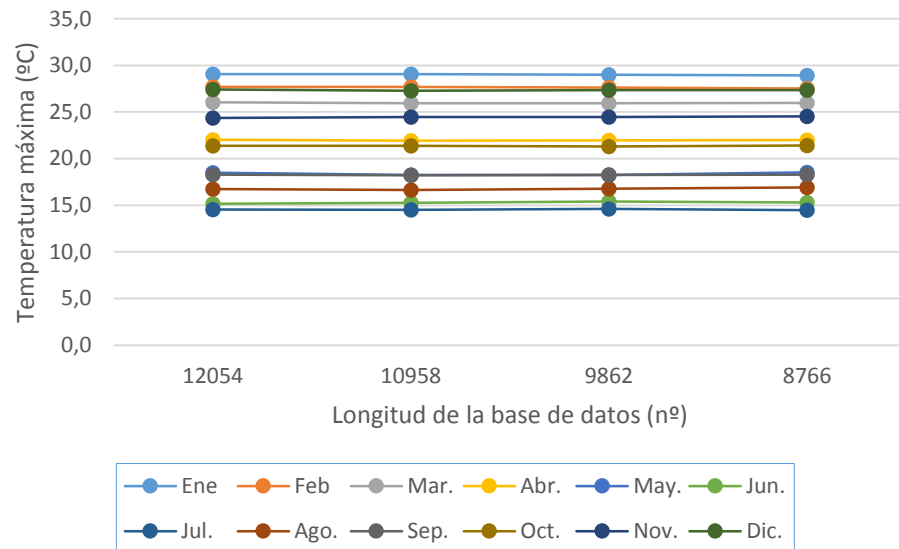


Figura 1. Promedio de temperatura máxima (°C) en Colonia, según número de registros.

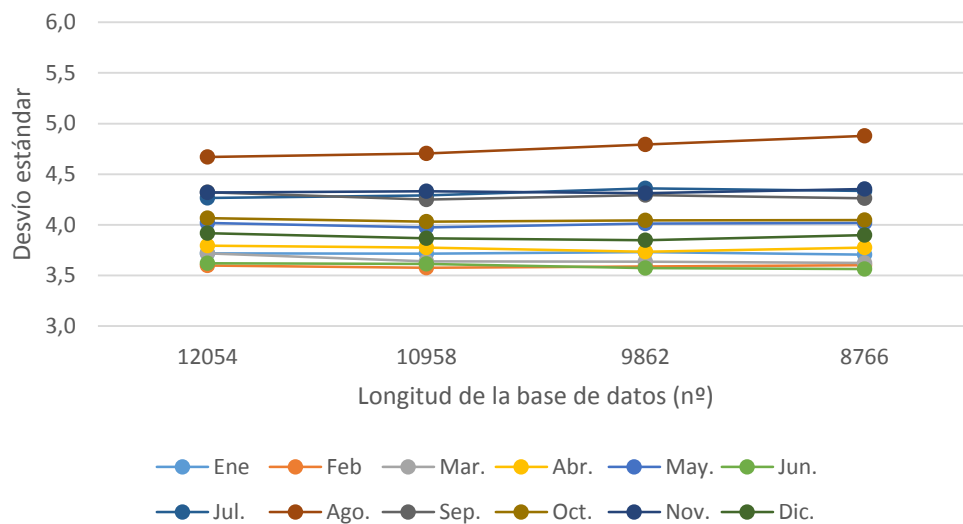


Figura 2. Desvío estándar de la temperatura máxima en Colonia, según número de registros.

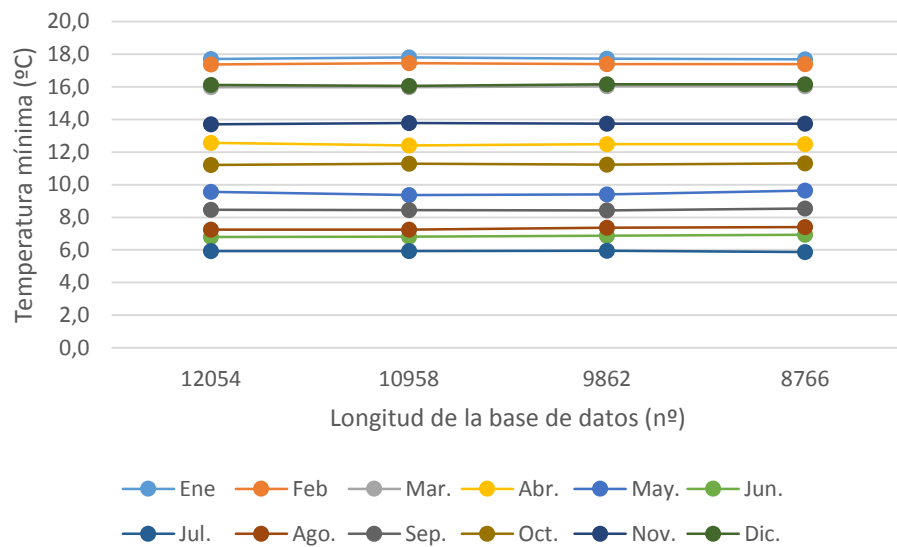


Figura 3. Valor del promedio de temperatura mínima (°C) en Colonia, según número de registros.

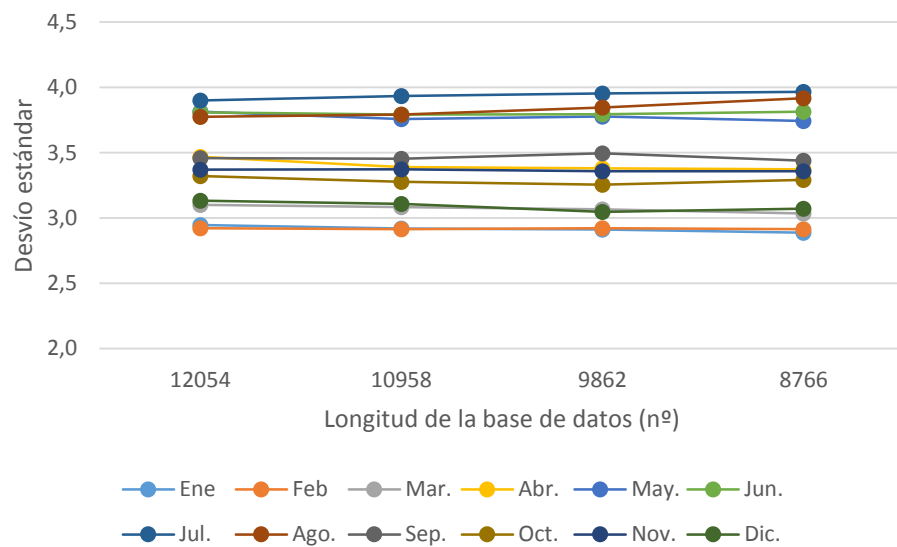


Figura 4. Desvío estándar de la temperatura mínima (°C) en Colonia, según número de registros.

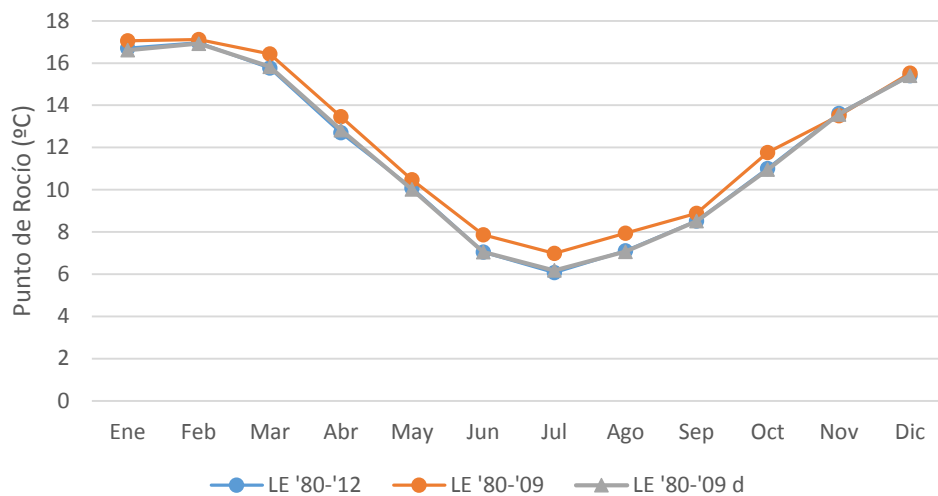


Figura 5. Temperatura del punto de rocío calculado en base a promedios mensuales (LE '80-'09) y calculado en base a registros diarios de temperatura media y humedad con dos largos de series La Estanzuela 1980-2012 (LE '80-'12) y La Estanzuela 1980-2009 (LE '80-'09 d).

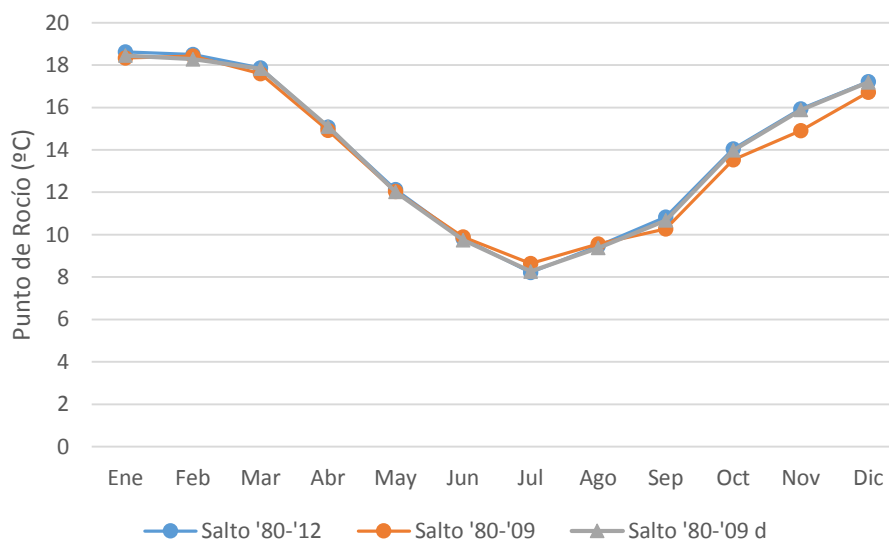


Figura 6. Temperatura del punto de rocío calculado en base a promedios mensuales (Salto 1980-2009) y calculado en base a datos diarios de temperatura media y humedad para dos largos de series Salto 1980-2012 y Salto 1980-2009 diarios.



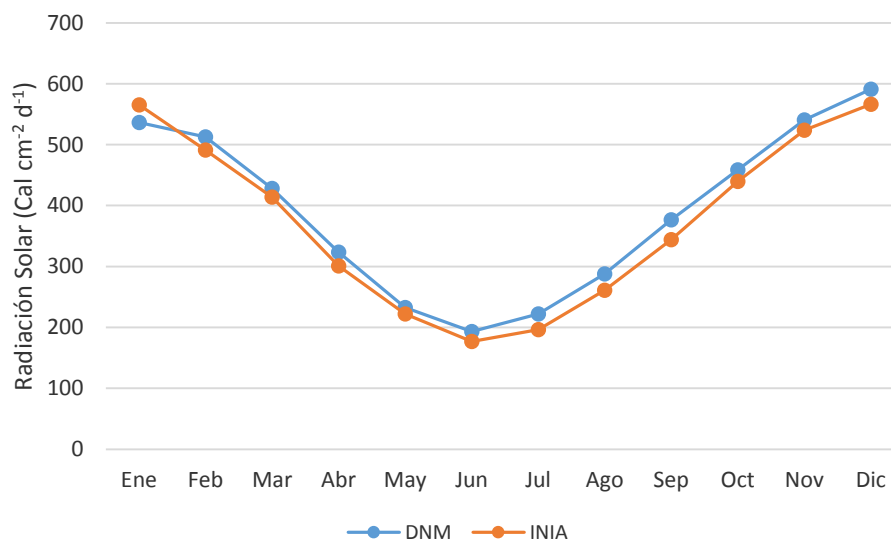


Figura 7. Estimación de la radiación solar a partir de horas de sol promedio mensual (INIA) y horas de sol promedio a partir de datos diarios (DNM), para Durazno.

La base de datos utilizada para Paysandú pertenece a la EEMAC, (dado que Meteorología lleva registrado únicamente desde el 2010 al 2013), y contiene los datos desde 2002 al 2012 inclusive (aproximadamente un tercio de los datos registrados en Colonia). El error de una base de datos incompleta como esta puede apreciarse en la siguiente gráfica.

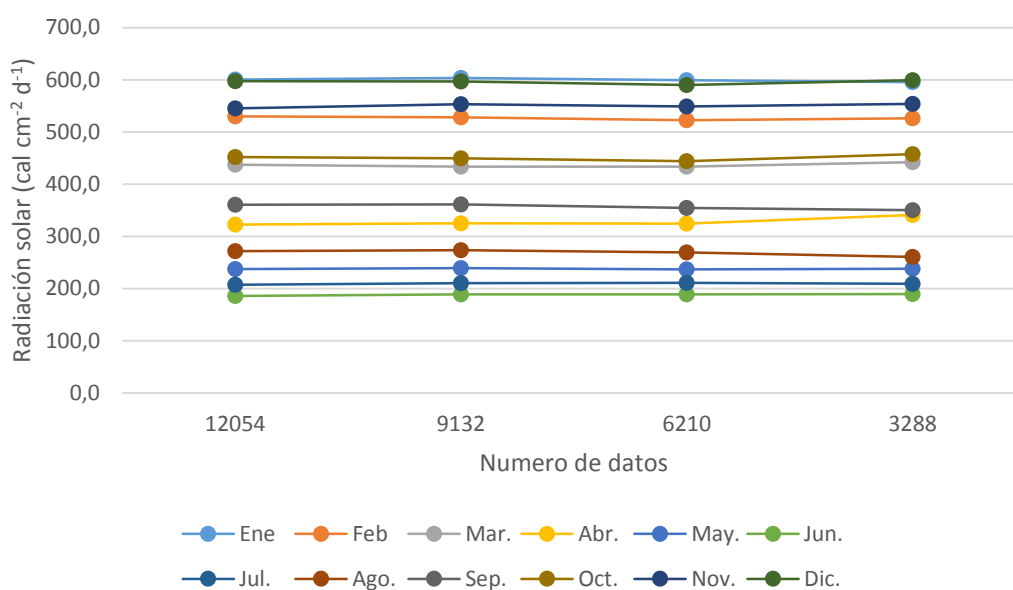


Figura 8. Radiación solar promedio ( $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) según número de registros en Colonia.

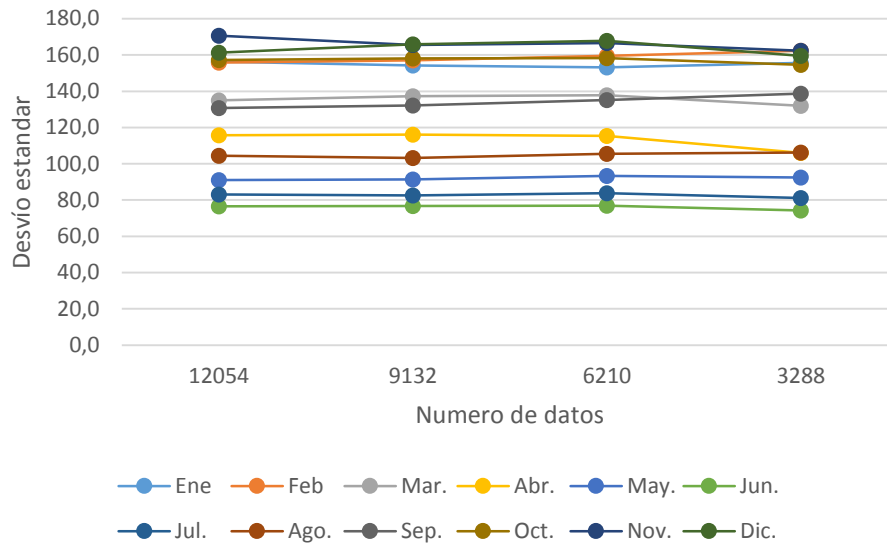


Figura 9. Desvío de la radiación solar según número de registros en Colonia.

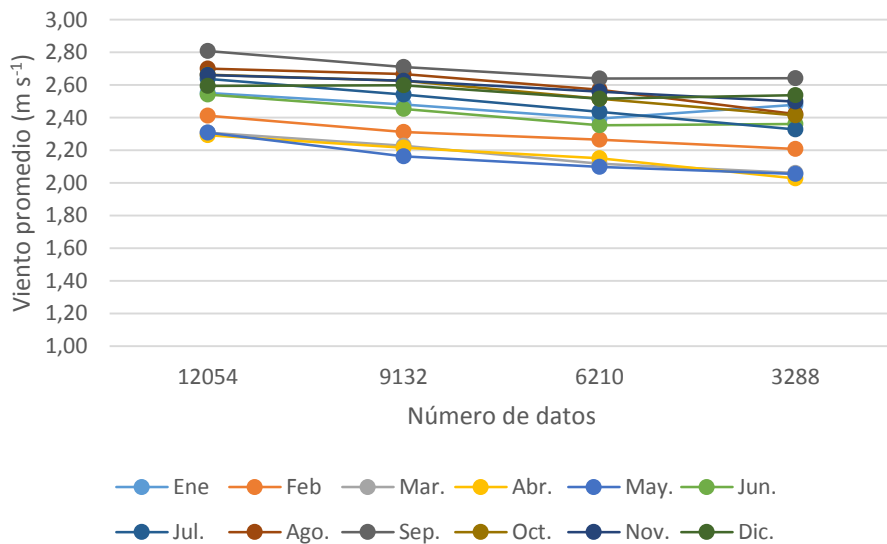


Figura 10. Valor del promedio mensual de viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) en Colonia según longitud de la base de datos.

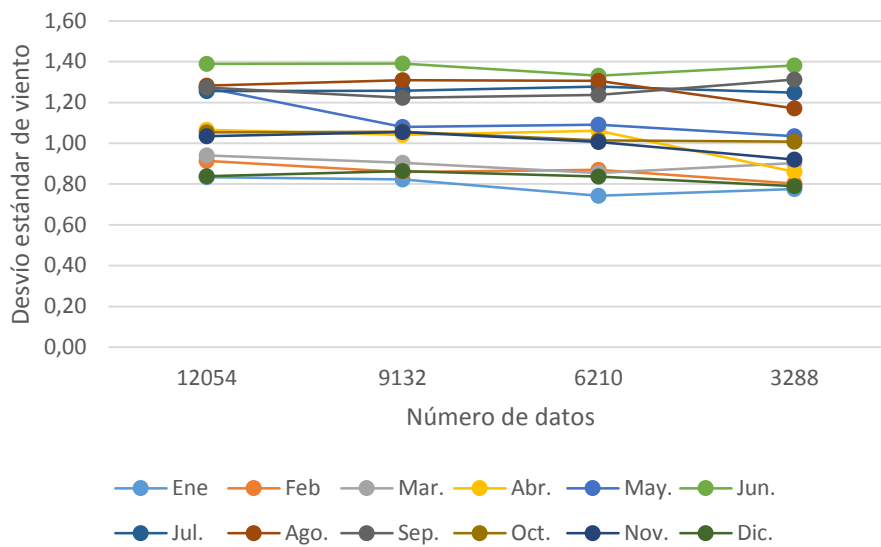


Figura 11. Desvío estándar del viento en Colonia según número de registros.

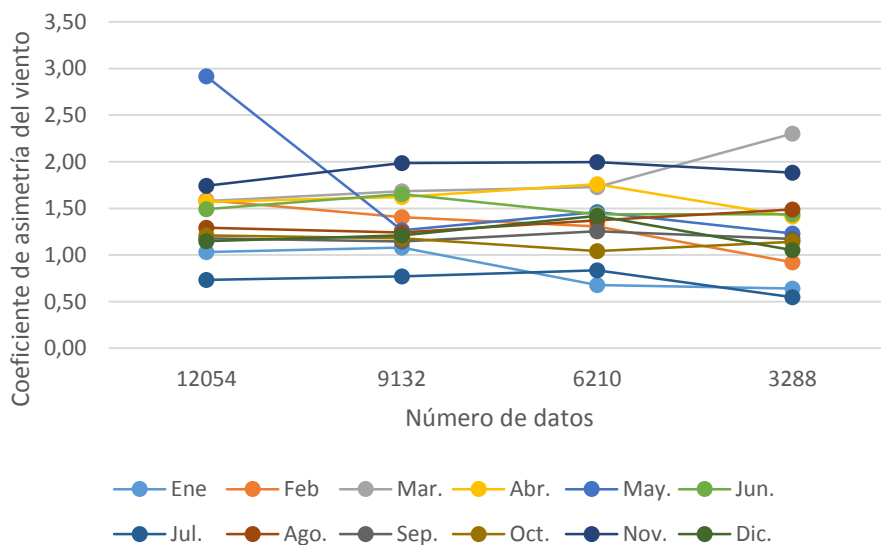


Figura 12. Valor del coeficiente de asimetría del viento en Colonia según número de registros.