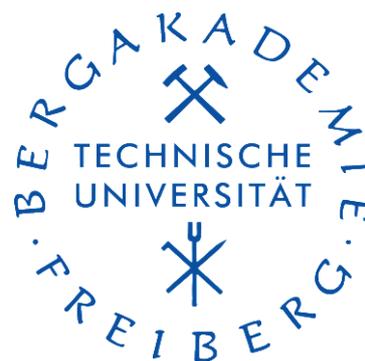


# GRADO DE CIENCIAS AMBIENTALES

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA EN COLABORACION CON

TU-BERGAKADEMIE DE FREIBERG



Trabajo Fin de Grado

## Procesos basados en la modelización de la distribución de carbono en la escala de paisaje

**Autor:**

Daniel Lázaro Maeso

**Directores:**

Jürgen Schmidt y Marcus Schindewolf (Freiberg)

Miguel Cueto Romero (Almería)

*Septiembre 2014*

## Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mis tutores Jürgen Schmidt y Miguel Cueto la oportunidad de poder realizar este proyecto con ellos, compartir sus conocimientos conmigo y su comprensión hacia mí.

También quiero agradecer a, una de las partes más importantes de este trabajo, Marcus Schindewolf, quien ha depositado toda su confianza en mí, brindándome su apoyo y su gran profesionalidad, más aun estando en un país extranjero y dejándome entrar en su “mundo profesional” sin ningún tipo de objeción.

Por último, agradecer a todas las personas que me han acompañado a lo largo de este año de Erasmus, que han hecho que mi estancia en Alemania, sea lo más parecido a un hogar en todos los sentidos.

*“El problema surge, solo y cuando, la felicidad deja de ser el camino  
y se convierte en la meta”*

## Resumen

Diversos estudios recientes han señalado la gran importancia de la erosión del suelo en la transferencia de carbono (la erosión continua de una zona provoca la pérdida de carbono acumulado), es por esta razón, que con este trabajo y siendo su objetivo principal, se tratará de modelizar este proceso, gracias al simulador “Erosión 2D” proponiéndose como escenario de trabajo una pendiente en el terreno de 407 metros de longitud y diversos manejos del suelo (de conservación, convencional, bandas de vegetación...).

En este proyecto, se intentarán resolver algunas dudas acerca de la distribución de carbono en las partículas del suelo, así como la transferencia de carbono causada por la erosión según las características climáticas que definen la zona de estudio. Por lo que la parametrización del carbono (pérdida y enriquecimiento de carbono) se llevará a cabo con una base de datos de uso de suelo existentes procedentes de Alemania y de Brasil, para ello se usarán diversos datos intermedios capaces de formar dicha parametrización del carbono cuando se analizan en conjunto.

Los datos obtenidos muestran la íntima relación que existe entre la pérdida de suelo y la labranza del suelo así como la eficiente protección que ofrece la “no labranza” del terreno a la hora de cultivar. Las bandas de vegetación, como medida de prevención, resultan también útiles a la hora de amortiguar los efectos de la erosión hídrica en dichas zonas de estudio.

## ÍNDICE

1- INTRODUCCIÓN.....	9
- Proceso de erosión y transporte de sedimentos.....	9
▪ Definición.....	9
▪ Erosión hídrica.....	9
○ Tipos de erosión hídrica.....	9
○ Influencia de las gotas de lluvia.....	10
○ Transporte y deposición de las partículas en relación al Carbono.....	10
2- JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	11
3- ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	15
▪ Área de estudio.....	15
▪ Simulador Erosion 2D.....	18
○ Descripción del modelo.....	18
○ Método de separación de fracciones arena – limo – arcilla (Atterberg).....	20
○ Factores de distribución del carbono.....	21
○ Diferentes usos de suelo empleados en la simulación.....	24
4- RESULTADOS.....	29
- SIMULACIONES.....	29
5- DISCUSIÓN.....	40
6- CONCLUSIONES.....	52
7- BIBLIOGRAFÍA.....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS:

- Figura 1: Parámetros de entrada del simulador.....	12
- Figura 2: Parámetros de salida del simulador. ....	13
- Figura 3: Pendiente usada en Erosion 2D para la modelización.....	13
- Figura 4: Situación geográfica de Erzgebirge (Alemania).....	15
- Figura 5: Climograma de la región de Erzgebirge. ....	16
- Figura 6: Situación geográfica de Campo Verde (Brasil). ....	16
- Figura 7: Climograma de Campo Verde. ....	17
- Figura 8: Valores límite en la clasificación Atterberg. ....	21
- Figura 9: Clases texturales en Alemania. ....	21
- Figura 10: Factores de distribución de carbono en Alemania (Cambisoles).....	22
- Figura 11: Factores de distribución de carbono en Brasil (Ferralsoles).....	22
- Figura 12: Porcentaje de Arena – Limo – Arcilla que posee inicialmente cada tipo de suelo. ....	23
- Figura 13: Composición inicial de arcilla (clay) – limo (slim) – arena (sand) en % en UT3. ....	23
- Figura 14: Composición inicial de arcilla (clay) – limo (slim) – arena (sand) en SU3. ....	23
- Figura 15: Parámetros de entrada del simulador Erosion 2D.....	25
- Figura 16: Parámetros de salida del simulador Erosion 2D.....	26

- Figura 17: Medida de la erosión producida en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3 en Alemania. ....	29
- Figura 18: Medida de la escorrentía superficial en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3 en Alemania. ....	30
- Figura 19: Medida de la pérdida de sedimentos total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3 en Alemania. ....	30
- Figura 20: Medida de la pérdida de carbono total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3 en Alemania. ....	31
- Figura 21: Medida del enriquecimiento de carbono en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3 en Alemania. ....	31
- Figura 22: Medida de la erosión producida en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3 en Alemania. ....	32
Figura 23: Medida de la escorrentía superficial en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3 en Alemania. ....	33
Figura 24: Medida de la pérdida de sedimentos total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3 en Alemania. ....	33
- Figura 25: Medida de la pérdida de carbono total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3 en Alemania. ....	34
- Figura 26: Medida del enriquecimiento de carbono en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3 en Alemania.....	34
Figura 27: Medida de la erosión producida en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3 en Brasil.....	35
- Figura 28: Medida de la escorrentía superficial en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3 en Brasil.....	35

-	Figura 29: Medida de la pérdida de sedimentos total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3 en Brasil.....	36
-	Figura 30: Medida de la pérdida de carbono total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3 en Brasil.....	36
-	Figura 31: Medida del enriquecimiento de carbono en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3 en Brasil.....	37
	Figura 32: Medida de la erosión producida en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3 en Brasil.....	37
-	Figura 33: Medida de la escorrentía superficial en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3 en Brasil.....	38
-	Figura 34: Medida de la pérdida de sedimentos total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU 3 en Brasil.....	38
-	Figura 35: Medida de la pérdida de carbono total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3 en Brasil.....	39
-	Figura 36: Medida del enriquecimiento de carbono en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3 en Brasil.....	39
-	Figura 37: Gráfico que muestra la perdida de carbono total según el tipo de suelo estudiado en un cultivo convencional.....	42
-	Figura 38: Gráfico que muestra la perdida de carbono total según el tipo de suelo estudiado en diferentes tipos de manejo de suelo.....	42
-	Figura 39: Gráfico que muestra la perdida de carbono total según el tipo de suelo estudiado en un manejo convencional con bandas de vegetación tanto de 10 como de 40 metros.....	43
-	Figura 40: Gráfico que muestra la perdida de carbono total según el tipo de suelo estudiado en un manejo convencional con bandas de vegetación tanto de 10 como de 40 metros al final de la pendiente. ....	43

- Figura 41: Gráfico que muestra el enriquecimiento de carbono total según el tipo de suelo estudiado en un manejo convencional comparándose con datos de Alemania y Brasil.....	44
- Figura 42: Gráfico que muestra el enriquecimiento de carbono total según el tipo de suelo estudiado en un manejo convencional con bandas de vegetación en mitad comparándose con datos de Alemania y Brasil. ....	45
- Figura 43: Gráfico que muestra la pérdida de carbono en diferentes tipos de suelo según el tipo de manejo empleado (convencional o de conservación).....	46
- Figura 44: Gráfico que muestra la pérdida de carbono en un suelo SL4 con diferentes tamaños de bandas de vegetación en mitad de la pendiente y diferentes tipos de manejo (convencional o de conservación).....	47
- Figura 45: Gráfico que muestra la pérdida de carbono en suelos uniformes sin bandas de vegetación. ....	48
- Figura 46: Gráfico que muestra la pérdida de carbono en suelos uniformes con bandas de vegetación. ....	48
- Figura 47: Gráfico que muestra la producción de sedimentos y la pérdida de carbono en suelos SL4 sin bandas de vegetación a lo largo de la pendiente.....	49
- Figura 48: Gráfico que muestra la producción de sedimentos y la pérdida de carbono en suelos SL4 con bandas de vegetación a lo largo de la pendiente. ....	49
- Figura 49: Gráfico que muestra la relación entre la pérdida de arena, limo y arcilla con el enriquecimiento de carbono decreciente.....	50
Figura 50: Gráfico que muestra la relación entre la pérdida de arena, limo y arcilla con el enriquecimiento de carbono creciente.....	50

## 1. INTRODUCCIÓN

### Proceso de Erosión y transporte de sedimentos.

#### Definición:

La erosión se puede definir como el desgaste y modelación de la corteza terrestre causada por la acción del viento, la lluvia, los procesos fluviales, marítimos y glaciales, y por la acción de los seres vivos. Como resultado de este proceso, se manifiesta un descenso de la fertilidad natural del suelo, descenso de su productividad biológica, pérdida de materia orgánica y una gran disminución de su capacidad para la retención de agua. La intensidad y caracterización de los procesos erosivos que suceden en un área determinada, son dependientes de sus condiciones climáticas y topográficas.

#### Erosión Hídrica:

La erosión hídrica (Uno de los fenómenos geológicos más comunes) explica, en gran parte, la suavización del relieve de las montañas y el desarrollo de las llanuras. Dentro de esta erosión, nos encontramos con la erosión normal (lenta pero ineludible) y la erosión acelerada (excede de la tasa normal y resulta demasiado destructiva).

Dentro de la erosión acelerada existen dos fases bien diferenciadas:

- Efecto de desgaste.
- Transporte por flotación, rodadura, arrastre y enlodamiento.

#### Tipos de erosión hídrica

- *Erosión laminar*: Remoción uniforme de la capa arable del suelo, observándose ciertas manchas blancas en las laderas, donde la materia orgánica ha desaparecido por efecto de la lluvia (menor productividad del suelo).
- *Erosión en surcos*: Al incrementarse el caudal, el agua erosiona el suelo formando unos surcos (canales continuos de anchura reducida y escasa profundidad).
- *Erosión en cárcavas*: Proceso causado por la evolución del flujo de agua en un surco en toda su geometría. Obteniéndose deslizamientos del suelo de los lados y en la cabecera debido a la poca resistencia del suelo en sus bordes.

### Influencia de las gotas de lluvia:

Cuando las gotas de lluvia impactan sobre el suelo, nos encontramos con 3 acciones principales:

- Separación del suelo.
- Destrucción de la granulación.
- Transporte del suelo.

Esta influencia de las gotas de lluvia es tan grande, que no hace solo que los gránulos del suelo se pierdan, sino que los fragmenta en trozos, desapareciendo dicha agregación del suelo expuesto a la lluvia.

### Transporte y deposición de las partículas en relación al Carbono.

La erosión hídrica viene determinada por las características intrínsecas de la propia lluvia y del terreno sometido a ella, aunque para muchos expertos (Strickland et al., 2005; Truman et al., 2007; Polyakov & Lal, 2008 Jacinthe et al., 2004) las características de la lluvia más estrechamente relacionadas con la movilización y transferencia del carbono son la intensidad y duración de las precipitaciones, aunque no se sabe a ciencia cierta el proceso verdadero proceso, se suele otorgar el transporte de sedimentos ricos en nutrientes a las precipitaciones leves/cortas y la gran cantidad de sedimentos, lo que conlleva más cantidad de carbono, a las lluvias fuertes/largas. La región Mediterránea es un claro ejemplo de como una zona de estudio puede ser testigo de la antigua erosión hídrica, gracias a los paisajes deforestados y degradados que se observan hoy en día (Toy et al., 2002).

En las investigaciones realizadas sobre la erosión hídrica y su capacidad de transporte/deposición de carbono, los mayores esfuerzos se centran en la descripción y análisis de los procesos a escala de detalle, es por ello que algunos estudios muestran que en determinadas zonas existe un patrón de movimiento del suelo y movilización de carbono (Ritchie et al., 2007).

La erosión hídrica moviliza el carbono orgánico e inorgánico de manera diferente, afectando a las partículas superficiales más pequeñas y de menor densidad. Por esta razón, el CO del suelo (Con baja estabilidad y alta concentración en los horizontes superficiales) es fácilmente movilizado y se puede acumular en los sedimentos a mayores concentraciones que en los suelos de donde procede. El enriquecimiento de carbono o razón de enriquecimiento (RE) es una medida que toma valores por encima de 1 cuando

la concentración de CO en los sedimentos es mayor que en los suelos originales.

Algunos autores (Rodríguez et al., 2004) muestran una correlación entre el tamaño de partículas y la RE, siendo las de menor tamaño (arcilla y limo) las que presentan los valores más elevados. Otros autores (Roose et al., 2006) señalan hacia una diferenciación en la movilización de CO dependiendo del proceso erosivo, por ejemplo, siendo la erosión hídrica laminar la que moviliza, en su mayor parte, partículas muy pequeñas y superficiales, produciendo un RE mayor de 1, pudiendo aumentar en eventos de escorrentías débiles donde se erosionan los elementos más finos del suelo.

En las cárcavas se movilizan cantidades muy grandes de material pero una vez agotado el horizonte más superficial, las partículas erosionables son las más pobres en carbono.

## 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Como se ha indicado con anterioridad, el simulador que se empleará para modelizar dicha realidad descrita, será el programa EROSION 2D, usándose datos ya obtenidos previamente (Michael, 1996) gracias al trabajo del departamento de Geología en Freiberg, sobre diversos tipos de suelo en Alemania y Brasil. Todas estas simulaciones están referidas a 10 años de fuertes eventos de tormentas de 40 mm en 90 minutos con un máximo de intensidad de  $1,8 \text{ mm} \times \text{min}^{-1}$ . Con este simulador se pretenderá hacer una predicción acerca de la infiltración, desprendimiento, transporte y deposición de las partículas.

En primer lugar, se deben diferenciar los parámetros de entrada que ofrece el simulador, de los de salida:

- ENTRADA:

- Densidad del suelo ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ).
- Composición inicial del terreno de arcilla, limo y arena (%).
- Materia orgánica inicial (%).
- Humedad inicial (%)
- Erodibilidad ( $\text{Kg} \times \text{m} \times \text{s}^{-2}$ ).
- Rugosidad ( $\text{s} \times \text{m}^{-1/3}$ ).
- Cubierta vegetal (%).
- Factor Skin (-)

Soil/Land use	Model parameters		
	fine (%)	medium (%)	coarse (%)
Clay	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Silt	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Sand	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Organic matter (%)	Initial moisture (%)	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Erosion res. ( $\text{Kg} \times \text{m} \times \text{s}^{-2}$ )	Roughness ( $\text{s} \times \text{m}^{-1/3}$ )	Canopy cover (%)	Skin factor (-)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

**Figura 1:** Parámetros de entrada del simulador

- SALIDA

- Escorrentía ( $m^3/m$ )
- Concentración de sedimentos ( $Kg/m^3$ ).
- Pérdida de arcilla, limo y arena (%).
- Erosión producida ( $t/ha$ ).

Distance [m]	Runoff [ $m^3/m$ ]	Sed.volume [kg/m]	Sed.conc. [ $kg/m^3$ ]	Clay [%]	Silt [%]	Erosion [t/ha]	Depos. [t/ha]	Net erosion [t/ha]
1	0,016	0,000	0,000	0,0	0,0	0,000	0,000	0,000
2	0,032	0,639	19,984	21,1	78,7	3,195	0,000	3,195
3	0,048	1,485	30,963	21,7	78,1	4,950	0,000	4,950
4	0,064	2,522	39,437	21,7	78,2	6,305	0,000	6,305
5	0,080	3,725	46,602	21,4	78,4	7,451	0,000	7,451
6	0,096	5,087	53,033	21,1	78,7	8,479	0,000	8,479
7	0,112	6,600	58,974	20,8	79,0	9,429	0,000	9,429
8	0,128	8,255	64,541	20,4	79,4	10,319	0,000	10,319
9	0,144	10,066	69,953	20,1	79,7	11,184	0,000	11,184
10	0,160	12,011	75,128	19,7	80,0	12,011	0,000	12,011
11	0,176	14,103	80,192	19,4	80,4	12,821	0,000	12,821
12	0,192	16,343	85,185	19,1	80,7	13,619	0,000	13,619
13	0,208	18,727	90,103	18,8	81,0	14,405	0,000	14,405
14	0,224	21,248	94,929	18,4	81,3	15,177	0,000	15,177
15	0,240	23,916	99,725	18,1	81,6	15,944	0,000	15,944

Figura 2: Parámetros de salida del simulador

Existen más datos de salida, pero al no ser relevantes en este estudio no se han incluido en la lista.

Estos datos (Figs.1-2) vienen determinados por el tipo de relieve, el tipo de suelo y el tipo de precipitación, todos ellos se deben seleccionar previamente según el propósito de la investigación.

A partir de ahí es cuando el modelo, según una pendiente ya programada de 407 metros de longitud (Fig.3), será capaz de realizar las predicciones acorde a la investigación.

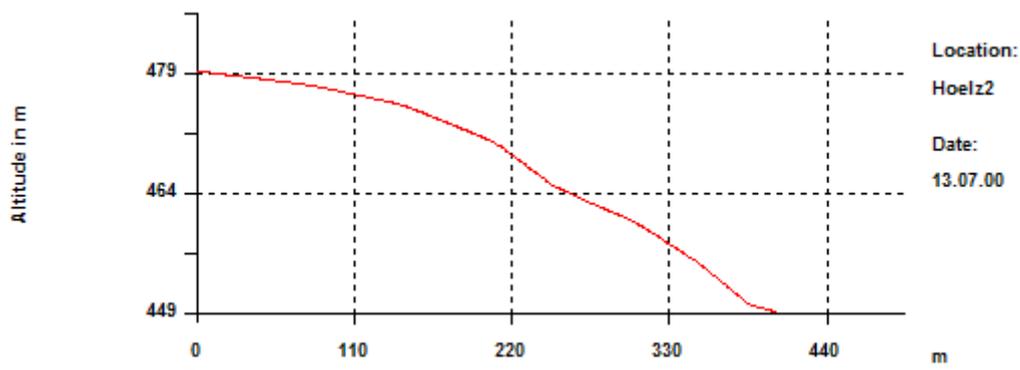


Figura 3: Pendiente usada en Erosión 2D para la modelización.

Los principales supuestos sobre la infiltración y erodibilidad del suelo dependerán del tipo de manejo de suelo que queramos estudiar con el simulador:

- Manejo convencional: ↓ Infiltración ↓ Erodibilidad
- Manejo de conservación: ↑ Infiltración ↑ Erodibilidad
- Bandas de amortiguación: ↑↑ Infiltración ↑↑ Erodibilidad

El propósito general de esta investigación es modelar la erosión producida en la pendiente mencionada, así como el transporte de sedimentos. Para ello se ajustaron diversas modelizaciones del terreno y de las características de la precipitación regional para complementar antecedentes edafológicos, de vegetación y de uso del territorio disponible. La principal necesidad de un estudio como éste viene dada por la existencia de amplias superficies con elevadas pendientes, con morfologías que permiten la rápida concentración del agua precipitada, escaso desarrollo de drenaje, el clima, y por supuesto, la creciente ocupación y uso sin planificación, lo que (todo junto) supone un gran riesgo de erosión hídrica.

Los principales objetivos de este trabajo/investigación son:

- 1- Obtener (gracias a los datos mencionados previamente) una base de datos fiables y consistentes para su estudio y lograr así una modelización de la erosión y escenarios lo más detallada posible.
- 2- Correlacionar LA PERDIDA DE CARBONO TOTAL y ENRIQUECIMIENTO DE CARBONO en función del tipo de suelo que se estudie, además de, observar como la estructura del suelo, la presencia/ausencia de bandas vegetales, el tipo de manejo de suelo... afecta, y de qué manera, a dicha pérdida y enriquecimiento de carbono.

### 3- ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

#### - ÁREA DE ESTUDIO

Las zonas de estudio de esta investigación son dos: Una situada en Alemania y otra situada en Brasil:

ALEMANIA: Sajonia (Erzgebirge)



**Figura 4:** Situación del área de estudio en Alemania: Erzgebirge (Sajonia)  
[www.es.climate-data.org](http://www.es.climate-data.org) (10/05/2014)

Esta zona (Fig.4) está situada en una cordillera en la frontera de Alemania y República Checa de unos 150 km de longitud. Se trata de una región con un clima húmedo, aunque con épocas con fuertes lluvias, recibe una precipitación regular y prolongada (625 mm/año) debido a su particular relieve y orientación (suave pendiente de nordeste a sudeste), siendo la temperatura media de unos 7.5 °C. Lo suelos predominantes son los luvisoles y cambisoles, así como los usos de suelo más frecuentes son los cultivos (Más del 56% de la superficie está destinada a la agricultura con el 79% para cultivos y el 21% restante para pastizales).

La distribución de los principales tipos de suelo se corresponde al tipo de paisaje. La parte norte está caracterizada por cambisoles y luvisoles sobre depósitos fluviales con pendientes bajas (0,9 – 3,0 %). En las franjas con menor espesor y gracias a los depósitos eólicos, se alcanzan cotas de hasta 20 metros con luvisoles y stagnosoles en las pendientes más pronunciadas (0,9 – 5,8 %). La parte sur de esta cordillera se caracteriza por podsoles, cambisoles y stagnosoles en diferentes roca madre, mientras que la pendiente de las tierras de cultivo se incrementa a un 5,4 – 8,5 %.

Debido a la amplia difusión de los suelos limosos, Sajonia está fuertemente afectada por la dislocación erosional de los sedimentos.

El muestreo de suelos se realizó en dos cuencas de depósito:

- Depósito de Bautzen: Usado para fines de recuperación de agua industrial y recreo con, principalmente, diferentes tipos de suelo limoso.
- Depósito Saidenbach: Producción de agua potable con suelos limosos también.

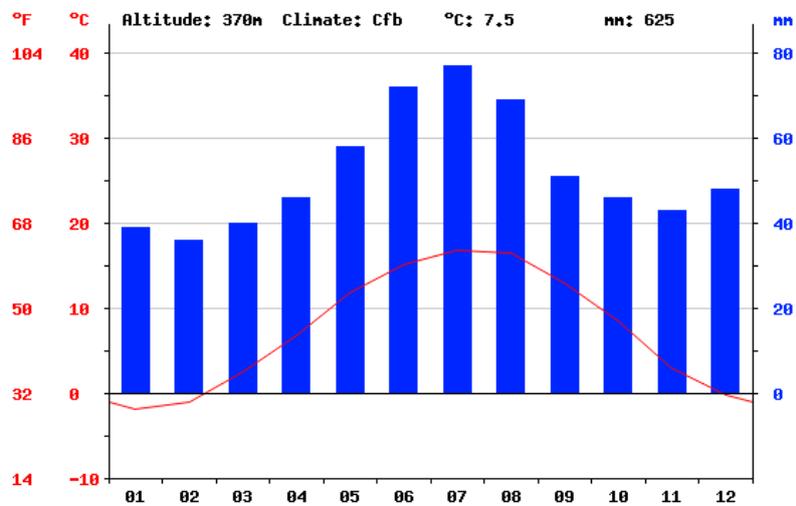


Figura 5: Climograma de Erzgebirge

### 1. BRASIL: Campo Verde (Mato Grosso)



Figura 6: Situación del área de estudio en Brasil: Campo Verde (Mato Grosso).

[www.es.climate-data.org](http://www.es.climate-data.org) (10/05/2014)

Esta región (Fig.6) está localizada al norte de la región Centro-Oeste de Brasil. El clima que disfruta es subtropical e hiperhúmedo, teniendo una temperatura media de unos 26 °C y una precipitación de 782 mm/año. Los suelos son ácidos, siendo los ferralsoles los predominantes. También el uso de la tierra va destinado a cultivos (en su mayor parte de soja y maíz).

Aunque estén ampliamente extendidos los Ferralsoles en dicha región (Latosolo vermelho, latosolo vermelho – amarelo y latosolo amarelo → Clasificación de Brasil), el área de estudio está caracterizada por una baja erosionabilidad del suelo, causada por los agregados del suelo que forman pseudo – arena y pseudo – limo. La agricultura intensiva también juega un papel importante en esta zona, ya que debido al impacto mecánico de las herramientas de labranza se produce un colapso total y, por tanto, mayor riesgo de desprendimiento y transporte de suelo. Este riesgo se ve acelerado por las lluvias intensas.

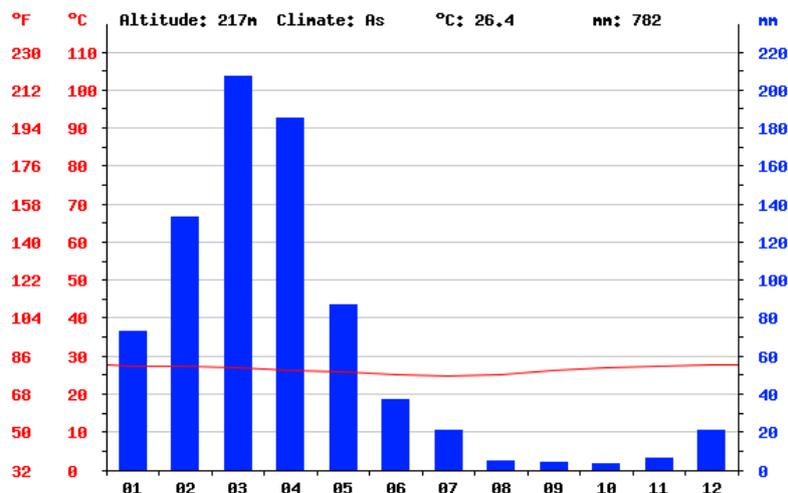


Figura 7: Climograma de Campo Verde

## - SIMULADOR EROSION 2D

### Descripción del modelo

El simulador empleado (Erosion 2D) es capaz de modelizar la pérdida de suelo, transporte y deposición de sedimentos, así como las aportaciones de sedimentos en las aguas superficiales producidas por las tormentas individuales o secuencia de ellas. Además, simula la distribución del tamaño de partículas de los sedimentos transportados, algo esencial a la hora de modelizar las entradas de fósforo con los sedimentos en los cursos de agua superficiales (Schmidt 1991, 1996; Werner 1995).

En comparación con otros modelos/simuladores, en Erosion 2D solo son necesarios unos pocos parámetros de entrada, permitiendo su uso para investigación o con fines de planificación.

En cuanto a la identificación de parámetros, el simulador emplea una herramienta de software interactiva DPROC, lo que permite la generación semiautomática de los datos de entrada del modelo mediante el uso del suelo y los demás datos referentes a ese suelo. Una base de datos relacionados deriva los parámetros del modelo en función del uso del suelo, las características del suelo y la fecha de simulación, estos datos se obtuvieron mediante experimentos de lluvia a mediados de la década de 1990 (Michael et al 1996) ampliada con nuevos datos en 2012.

El gran potencial de este simulador reside en la amplia gama de diferentes tipos de suelo, cultivos y labranza, así como las características y etapas fenológicas del cultivo que es capaz de soportar y analizar.

### DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ENTRADA

- DENSIDAD DEL SUELO (Kg/m<sup>3</sup>)  
En este caso, estudiaremos la “densidad aparente”, que se define como el cociente entre la masa de suelo seco y el volumen total del suelo, incluyendo la parte sólida como los poros.
  
- COMPOSICIÓN INICIAL DEL TERRENO DE ARCILLA, LIMO Y ARENA (%)  
La composición por tamaño de las partículas de un suelo, es el porcentaje de material mineral en peso de cada fracción, obtenida por separación de las partículas minerales en 2 o más clases por tamaño mutuamente excluyentes. En la mayoría de los estudios, en los suelos se separan en 3 clases por tamaño (arcilla, limo y arena) usándose análisis granulométricos o mecánicos para medir su composición.

- MATERIA ORGÁNICA INICIAL (%)

La materia orgánica es un componente del suelo formado por restos vegetales y animales, que gracias a la acción de la microbiota del suelo, son transformados en una materia rica en nutrientes para las plantas, asegurando así el reservorio y disponibilidad de estos nutrientes. La cantidad de materia orgánica en un suelo se suele expresar como porcentaje en base al peso del mismo suelo, aunque al ser esto más complicado en el laboratorio, se suele emplear la medida indirecta del carbono orgánico.
- HUMEDAD INICIAL (%)

Este término se emplear para referirse al agua retenida en dicho suelo y poder diferenciarla del agua subterránea. Para su medida se emplean diversos métodos como pueden ser los bloques porosos absorbentes, tensiómetros, conductivímetros...
- ERODIBILIDAD ( $\text{Kg} \times \text{m} \times \text{s}^{-2}$ )

La erodibilidad del suelo es un índice que indica la vulnerabilidad o susceptibilidad a la erosión y que depende de las propiedades intrínsecas de cada suelo. Cuanto mayor sea la erodibilidad mayor porcentaje de erosión.
- RUGOSIDAD ( $\text{s} \times \text{m}^{-1/3}$ )

La rugosidad superficial del suelo es uno de los factores que influencia significativamente la erosión eólica e hídrica a la que se ve sometido el suelo. En este estudio se refirió a la rugosidad del suelo como la desviación típica de las elevaciones superficiales del suelo, sin considerarse los cambios producidos por la pendiente del terreno o las huellas que puedan dejar ciertos laboreos.
- CUBIERTA VEGETAL (%)

La mayor erosión posible se produce en aquellos suelos que carecen de cubierta vegetal y que han sido arados impidiendo, así, cualquier efecto de reducción de la fuerza erosiva de la lluvia. Una de las maneras más efectivas de analizar la cubierta vegetal de una zona, es aplicándole un porcentaje en base a todo el terreno estudiado.
- FACTOR SKIN (-)

### DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SALIDA

- ESCORRENTÍA ( $m^3/m$ )  
Referida a la lámina de agua que recorre la zona estudiada, es decir la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. Normalmente se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración del suelo.
  
- CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS ( $Kg/m^3$ )  
Hace referencia a la cantidad de sedimentos que son arrastrados por la escorrentía a lo largo de la pendiente, obviamente, la mayor cantidad de sedimentos se encontrará al final del transepto estudiado (En condiciones normales, sin bandas de vegetación, vaguadas...).
  
- PÉRDIDA DE ARCILLA, LIMO Y ARENA (%)  
Se trata de una forma clásica y fácil de observar que cantidad (en porcentaje) se ha perdido de arcilla, limo y arena en los procesos de erosión previos.
  
- EROSIÓN PRODUCIDA ( $t/ha$ )  
Referida a la cantidad de suelo perdido en toneladas por unidad de hectáreas debido a los procesos erosivos.

### Método de separación de fracciones arena – limo – arcilla (Atterberg)

Este método se empleó con el fin de determinar la distribución de fósforo en las partículas de fracciones en los suelos muestreados. Ya que las partículas de suelo erosionado se separan mecánicamente por las gotas de lluvia y el flujo superficial, las muestras fueron preparadas por ultrasonidos en vez de dispersión química. Las partículas del suelo se separaron usando el enfoque/método Atterberg en base a la ley de Stoke.

Dominar esta granulometría es esencial para cualquier investigación sobre el suelo (hablamos de una perspectiva genética o aplicada). Aunque existen numerosos enfoques para clasificar a los constituyentes del suelo según su tamaño (solo difieren en los valores de los límites establecidos para definir cada clase), la clasificación de Atterberg es una de las más extendidas mundialmente, llamándose también “Internacional” por esta razón.

INTERNACIONAL						
piedra	grava	arena gruesa	Arena fina	limo	arcilla	
	20	2	0,2	0,02	0,002	mm

Figura 8: Valores límite en la clasificación Atterberg.

### Factores de distribución del Carbono.

A la hora de estudiar los factores de distribución del Carbono se debe tener en cuenta que tipo de suelo se está estudiando, en este trabajo se han empleado 4 suelos diferentes según su textura:

- SL 4 → Stark lehmiger sand (Franco arenoso fuerte).
- UT 3 → Mittel toniger schluff (Arcillo limoso medio) → **Franco limoso**
- ST 3 → Mittel toniger sand ( Arcillo arenoso medio).
- SU 3 → Mittel schluffiger sand (Areno limoso medio) → **Franco arenoso**

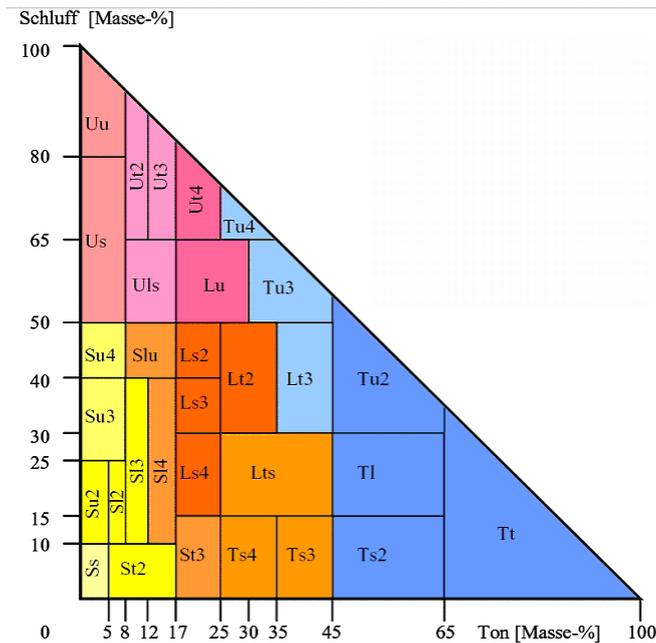
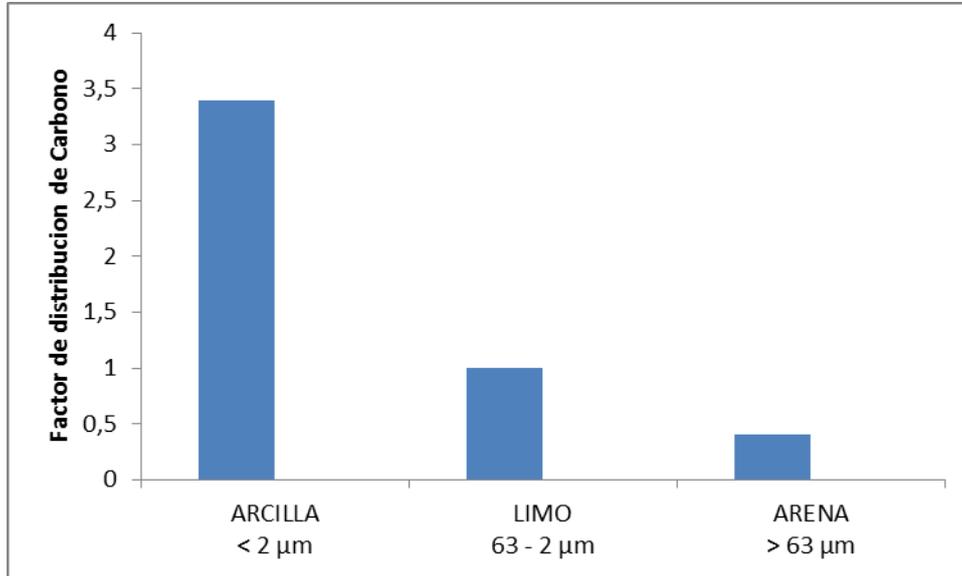


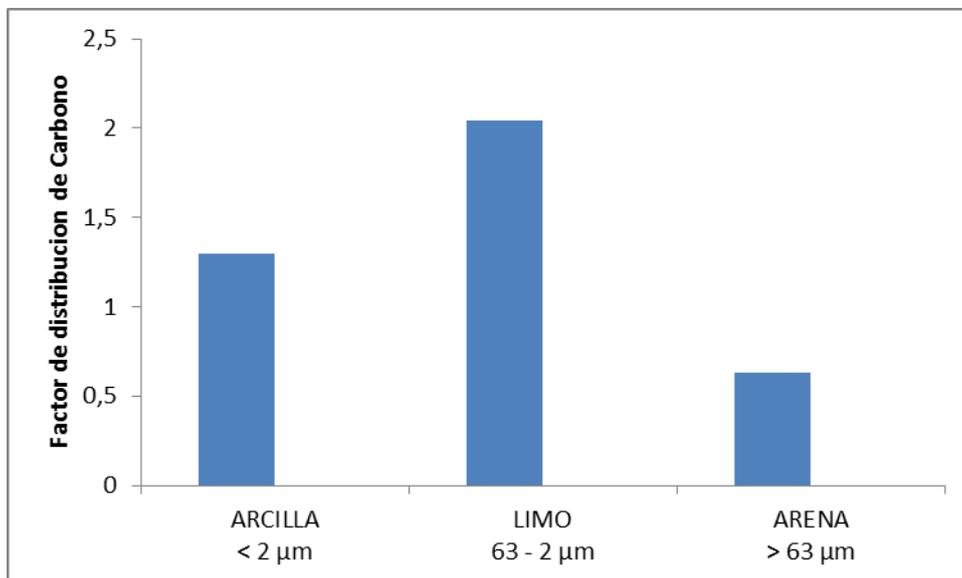
Figura 9: Clases texturales en Alemania

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/KA5\\_Diagramm.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/KA5_Diagramm.png) (25/06/2014)

Los análisis en laboratorio que se realizaron previamente a esta investigación revelan las diferentes distribuciones de carbono entre las clases de partículas según su tamaño, en los cambisoles alemanes y los ferralsoles brasileños (Figs.10-11).

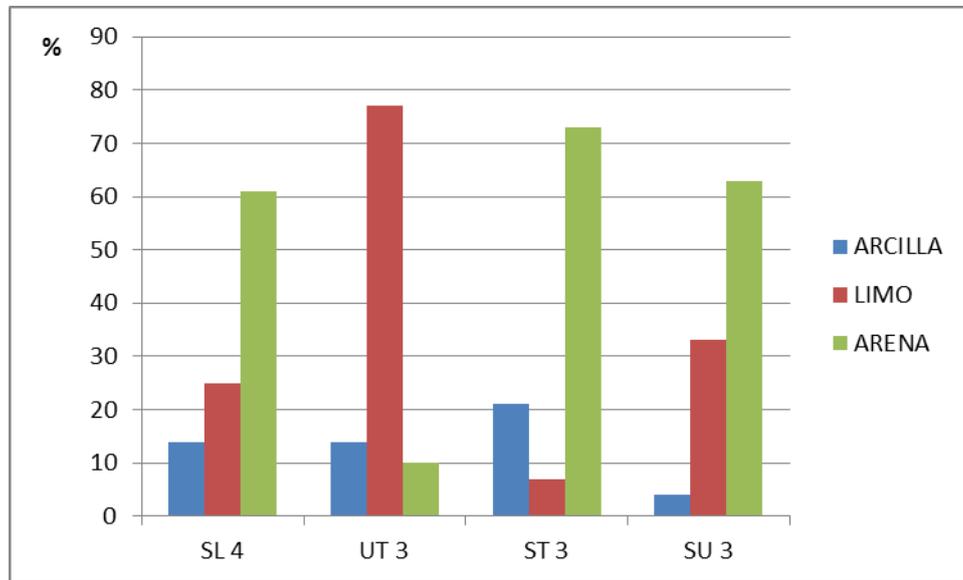


**Figura 10:** Factores de distribución de carbono en Alemania (Cambisoles).



**Figura 11:** Factores de distribución de carbono en Brasil (Ferralsoles).

Con estos datos de distribución de carbono, solo hacía falta saber que porcentaje de Arena – Limo – Arcilla poseía, inicialmente, cada tipo de suelo (estos datos los proporcionaba el simulador directamente), para poder estudiar la pérdida y/o enriquecimiento de carbono que producía en cada situación (Fig.12).



**Figura 12:** Porcentaje de Arena – Limo – Arcilla que posee inicialmente cada tipo de suelo.

Algunos ejemplos de cómo presenta el simulador dichos datos son:

	fine (%)	medium (%)	coarse (%)
Clay	0	14	0
Silt	14	27	35
Sand	2	4	4

**Figura 13:** Composición inicial de arcilla (clay) – limo (silt) – arena (sand) en % en UT3.

	fine (%)	medium (%)	coarse (%)
Clay	0	4	0
Silt	8	15	10
Sand	55	4	4

**Figura 14:** Composición inicial de arcilla (clay) – limo (silt) – arena (sand) en % en SU3.

### Diferentes usos de suelo empleados en la simulación.

Para lograr una mayor fiabilidad y consistencia en la recogida de muestras, se estudiarán diferentes tipos de uso de suelo para observar y analizar que cambios produce y, hasta que punto, es relevante a la hora de hablar de transporte y deposición de carbono.

Los tipos de manejo de suelo que se emplearán en la investigación son:

- *Método convencional:*

Actualmente, los cultivos convencionales se podrían definir como aquel sistema de producción extremadamente artificial, basado en el alto consumo de insumos externos (energía fósil, agroquímicos, etc.) sin considerar los ciclos naturales (<http://www.manualdelombricultura.com>).

Desde que se comenzó a cultivar el suelo con esta técnica convencional se han producido una serie de consecuencias extremadamente negativas en el medio ambiente (Enorme erosión de los suelos a nivel mundial, pérdida de su fertilidad, destrucción de bosques, pérdida de patrimonio genético, pérdida de biodiversidad, contaminación,...).

Uno de los principales motivos de todas estas consecuencias es, sin duda alguna, el arado convencional, responsable de la pérdida de terreno cultivable y del aumento en la velocidad de erosión del suelo.

- *Método de conservación:*

Este tipo de agricultura tiene como principios o bases conservar, mejorar y ser más eficientes a la hora de tratar con recursos naturales mediante un manejo integrado del agua, suelo y agentes biológicos. Esta técnica de cultivar el suelo se pone en práctica para intentar paliar la pérdida y degradación del suelo por culpa de las técnicas convencionales.

Para ello se opta por la reducción de laboreo, rotación de cultivos, uso racional de fertilizantes químicos, uso de material vegetal de cosechas pasadas como capa protectora y fértil lo que provoca un mayor aumento de la materia orgánica presente en el suelo así como mantiene la productividad del cultivo.

- *Método de siembra directa:*

Este método, también conocido como agricultura sin labranza, es una práctica agrícola en cultivos anuales, donde no se realiza ningún tipo de laboreo del suelo (lo que provoca la no destrucción de las capas fértiles del suelo), donde casi la mitad de la superficie cultivada se encuentra recubierta por restos vegetales y la siembra se realiza directamente sobre estos restos. Esto lo que provoca es una mayor tasa de infiltración de agua por el terreno y una mayor retención de materia orgánica en las capas fértiles del suelo, en definitiva, el mayor objetivo que persigue esta técnica es que los suelos cultivados obtengan una mayor resiliencia.

Ahora, el paso siguiente es estudiar los diferentes parámetros de entrada y de salida que proporciona el simulador, en función del tipo del tipo de suelo elegido y de su manejo (convencional, de conservación o siembra directa). Este paso se realiza para contrastar las elevadas diferencias que existen entre unos y otros parámetros en función del suelo elegido. Para ello, seleccionamos, por ejemplo, dos suelos muy diferentes con todas sus variantes de manejo:

- UT 3 → Mittel toniger schluff (Arcillo limoso medio).
- SU 3 → Mittel schluffiger sand (Areno limoso medio).

## PARÁMETROS DE ENTRADA

	DENSIDAD (Kg/m3)	MATERIA ORGANICA(%)	HUMEDAD INICIAL(%)
Ut3 CONVENCIONAL	1320	1	39
Ut3 CONSERVACIONAL	1320	1	39
Ut3 SIEMBRA DIRECTA	1320	1	39
Su3 CONVENCIONAL	1350	1	35
Su3 CONSERVACIONAL	1350	1	35
Su3 SIEMBRA DIRECTA	1350	1	35

RES.EROSION (Kg*m*s-2)	RUGOSIDAD (s*m -1/3)	COBERTURA VEGETAL	FACTOR CORRECCION SKIN
0,00021	0,015	0	1,2
0,0024	0,024	30	3
0,01	0,04	50	4
0,00025	0,015	0	0,9
0,0015	0,024	30	2
0,01	0,04	50	4

**Figura 15:** Parámetros de entrada del simulador Erosion 2D.

## PARÁMETROS DE SALIDA

	ESCORRENTÍA [m <sup>3</sup> /m]	CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS [kg/m <sup>3</sup> ]	EROSIÓN PRODUCIDA [t/ha]
Ut3 CONVENCIONAL	6,389	820,801	131,114
Ut3 CONSERVACIONAL	3,724	85,239	7,958
Ut3 SIEMBRA DIRECTA	3,77	82,763	7,822
Su3 CONVENCIONAL	4,465	261,86	29,886
Su3 CONSERVACIONAL	0,623	15,791	0,246
Su3 SIEMBRA DIRECTA	0,623	2,359	0,037

PÉRDIDA DE ARCILLA [kg/m <sup>3</sup> ]	PÉRDIDA DE LIMO [kg/m <sup>3</sup> ]	PÉRDIDA DE ARENA [kg/m <sup>3</sup> ]
797,07964	4273,815175	173,050185
20,951436	230,783242	65,711322
20,28169	226,530876	65,213434
115,754958	957,609198	95,877844
0,09837793	0,062923	0,518336
0,01469657	0,044856	0,372554

**Figura 16:** Parámetros de salida del simulador Erosion 2D.

(En los parámetros de salida, solo se han cogido los datos del último metro de la pendiente (407) para simplificar y esquematizar los valores).

Para todo ello, debe quedar constancia que simulaciones se han realizado para su posterior análisis:

- 1- SUELOS UNIFORMES SIN BANDAS DE VEGETACIÓN:  
Los 407 metros de la pendiente con un solo tipo de manejo (convencional, de conservación o siembra directa).
- 2- SUELOS MIXTOS SIN BANDAS DE VEGETACION:  
De los 407 metros de pendiente, los primeros 240 metros se simuló un cultivo convencional y los 167 restantes uno de conservación y viceversa.
- 3- SUELOS UNIFORMES CON BANDAS DE VEGETACION EN MITAD:  
Se simuló un manejo convencional, con la particularidad de colocar bandas de vegetación de diferentes tamaños (10, 20, 30 y 40 metros) en mitad de la pendiente. Y otro de conservación, también con bandas de vegetación de diferentes tamaños (10, 20, 30 y 40 metros) en mitad de la pendiente.

- 4- SUELOS UNIFORMES CON BANDAS DE VEGETACIÓN AL FINAL:  
Se simuló un manejo convencional, con la particularidad de colocar bandas de vegetación de diferentes tamaños (10, 20, 30 y 40 metros) al final de la pendiente. Y otro de conservación, también con bandas de vegetación de diferentes tamaños (10, 20, 30 y 40 metros) al final de la pendiente.
- 5- SUELOS UNIFORMES CON BANDAS EN LA MITAD Y AL FINAL:  
Se emplearon bandas de vegetación de diferentes tamaños (10, 20, 30 y 40 metros) en mitad de la pendiente y al final de ella, para separar iguales tipos de manejo (siempre el mismo tamaño en la banda de la mitad y del final).
- 6- SUELOS MIXTOS CON BANDAS DE VEGETACIÓN EN LA MITAD:  
Arriba de la pendiente se simuló un tipo de manejo y abajo otro (convencional/de conservación y de conservación/convencional), separados por una banda de vegetación de diferentes tamaños (10, 20, 30 y 40 metros).
- 7- SUELOS MIXTOS CON BANDAS DE VEGETACIÓN AL FINAL:  
Se simularon dos tipos de manejo (convencional y de conservación y viceversa), estando uno en la parte superior de la pendiente y otro en la parte inferior, con una banda de vegetación de diferentes tamaños al final.
- 8- SUELOS MIXTOS CON BANDAS DE VEGETACION EN MITAD Y AL FINAL:  
Se emplearon bandas de vegetación de diferentes tamaños (10, 20, 30 y 40 metros) para separar diferentes tipos de manejo (convencional y de conservación) en mitad de la pendiente y al final de ella (siempre el mismo tamaño en la banda de la mitad y del final).

Todas estas simulaciones se realizaron con los 4 tipos de suelo vistos con anterioridad:

- SL 4 → Stark lehmiger sand (Franco arenoso fuerte).
- UT 3 → Mittel toniger schluff (Arcillo limoso medio) → **Franco limoso**
- ST 3 → Mittel toniger sand ( Arcillo arenoso medio).
- SU 3 → Mittel schluffiger sand (Areno limoso medio) → **Franco arenoso**

Y se realizaron por partida doble, tanto en el área situada en Brasil como para la situada en Alemania.

El siguiente paso es seleccionar las simulaciones de mayor interés en nuestro estudio, para poder discutir los resultados:

- Se seguirán usando los suelos UT3 y SU3 para elaborar las graficas y tablas.
- Se graficarán los datos tanto para Alemania como para Brasil.

- Los tipos de manejo que se emplearán son:
  - Convencional sin bandas.
  - Convencional/De conservación sin bandas.
  - De conservación/Convencional sin bandas.
  - Convencional/ De conservación con bandas de vegetación de 20 metros en mitad y al final.
  - De conservación/ Convencional con bandas de vegetacion de 20 metros en mitad y al final.
  
- Los parámetros a modelizar serán:
  - Erosión producida en la pendiente.
  - Escorrentía superficial en la pendiente.
  - Concentración de sedimentos.
  - Pérdida de carbono.
  - Enriquecimiento de carbono.

El método que se empleará será estudiar un tipo de suelo (Los datos sobre los 4 tipos de suelo no se plasmarán en este trabajo porque se alargaría demasiado el documento, por lo que se ha optado por presentar todos los datos en excel en los anexos de tablas pero aquí solo se incluirán UT3 primero y SU3 después) y se esquematizarán los resultados obtenidos de sus diferentes parámetros en todas las variantes de tipo de manejo explicadas anteriormente, para poder contrastar las diferencias, aunque sin entrar en una clara discusión de resultados.

## 4- RESULTADOS

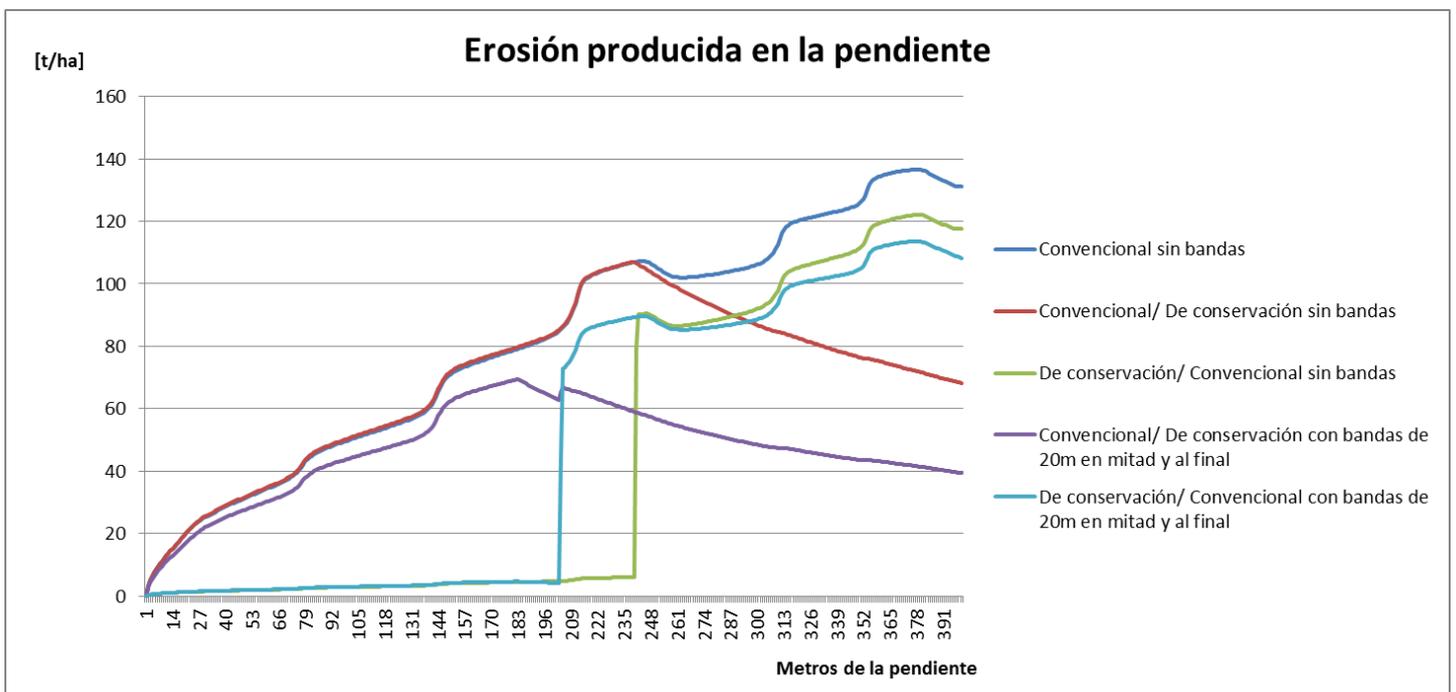
### 5.1. Simulaciones

#### ALEMANIA

#### UT 3

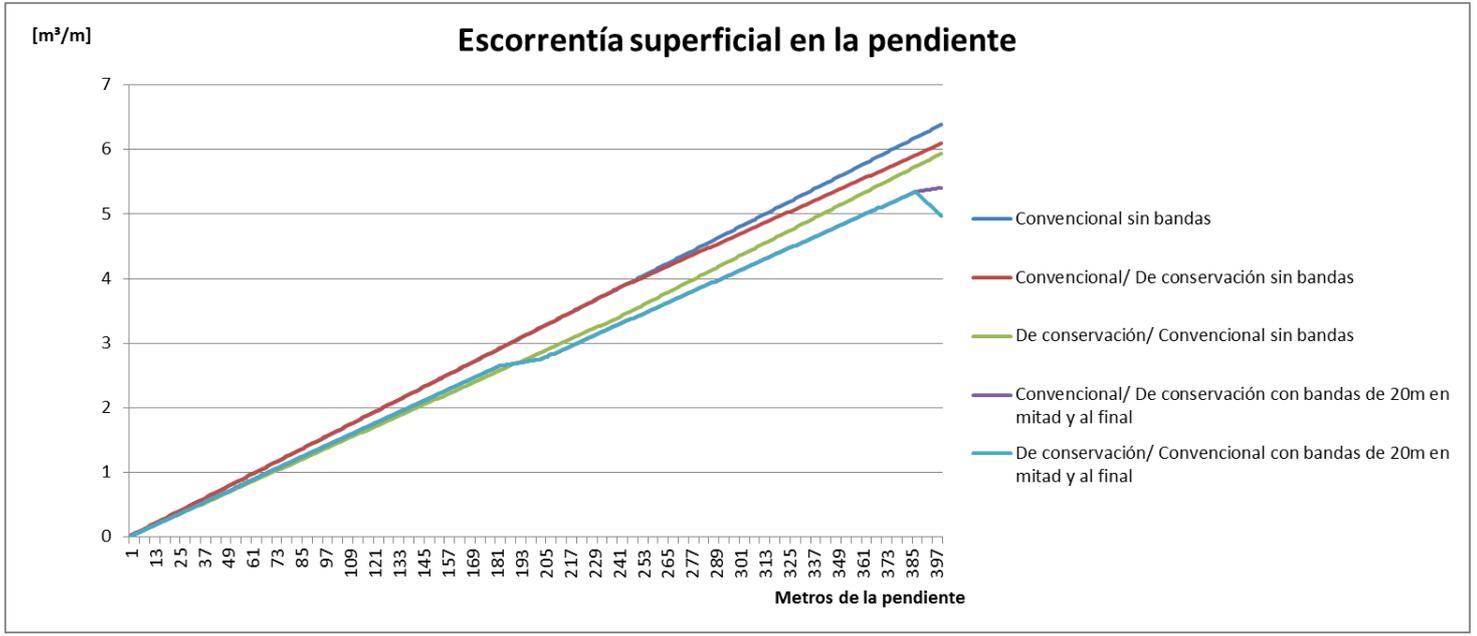
Mittel toniger schluff (Arcillo limoso medio) → *Franco limoso*

#### EROSIÓN PRODUCIDA EN LA PENDIENTE



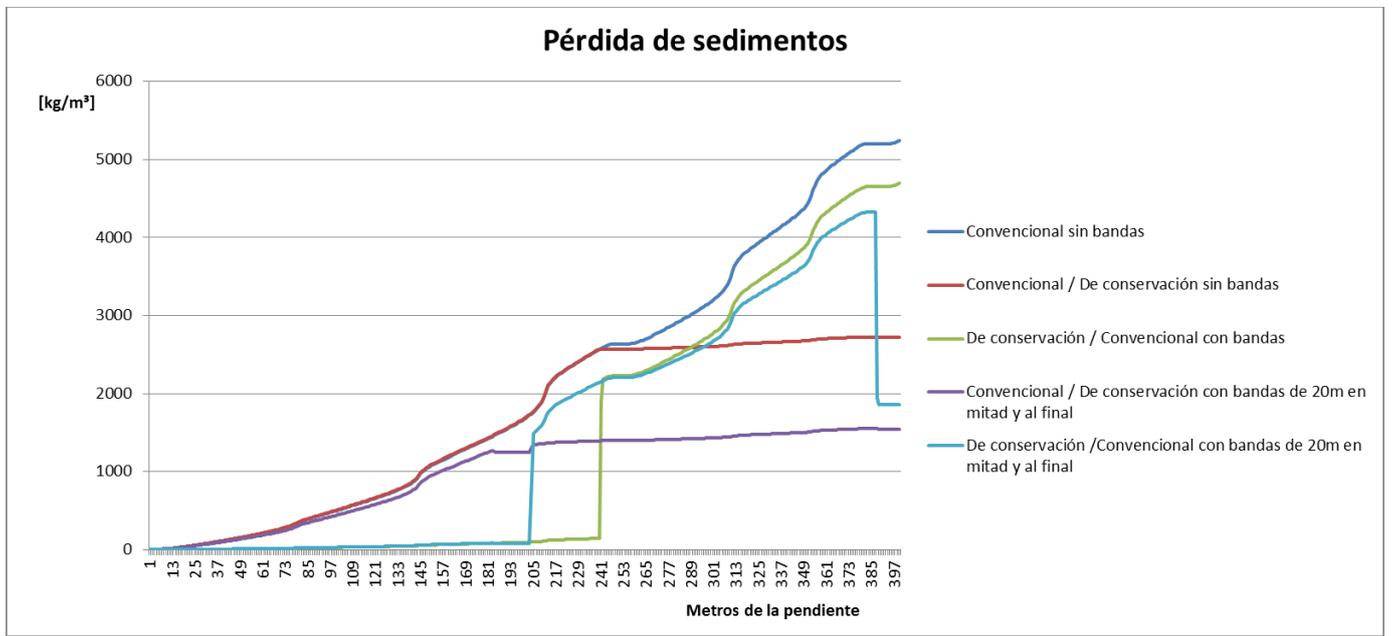
**Figura 17:** Medida de la erosión producida en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3.

### ESCORRENTÍA SUPERFICIAL



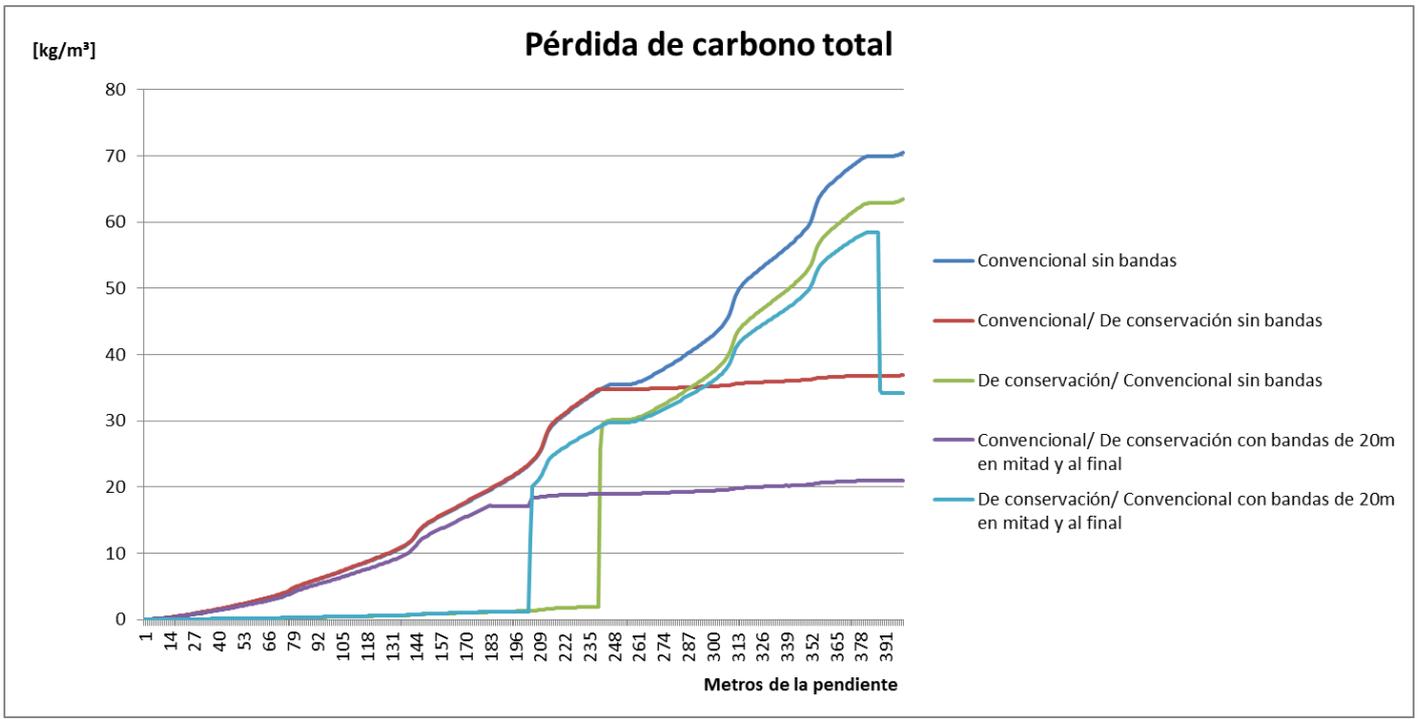
**Figura 18:** Medida de la escorrentía superficial en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3.

### PÉRDIDA DE SEDIMENTOS



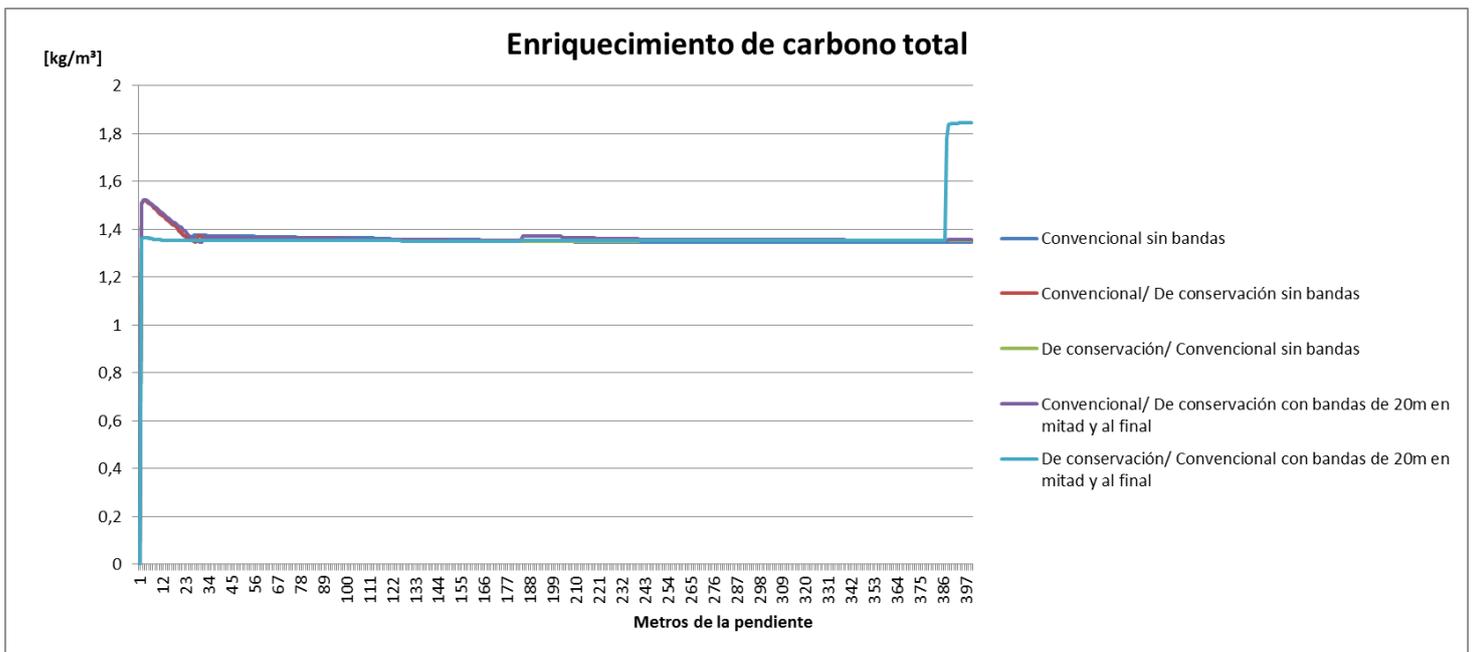
**Figura 19:** Medida de la pérdida de sedimentos total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3.

### PÉRDIDA DE CARBONO TOTAL



**Figura 20:** Medida de la pérdida de carbono total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3.

### ENRIQUECIMIENTO DE CARBONO

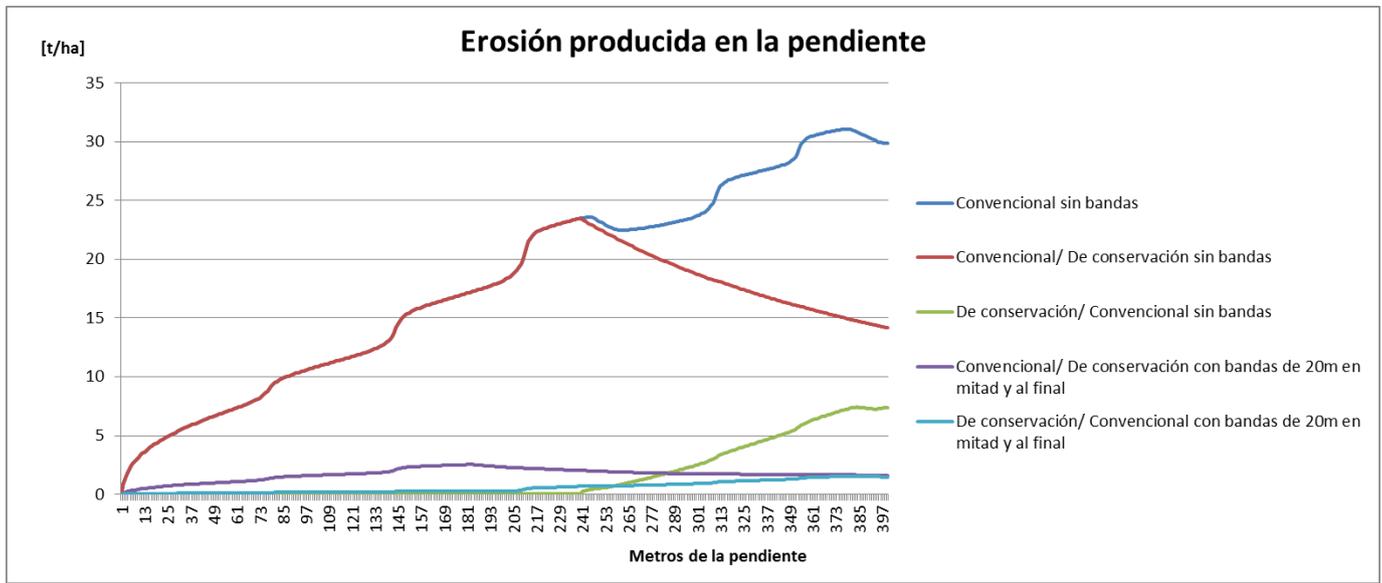


**Figura 21:** Medida del enriquecimiento de carbono en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3.

### SU 3

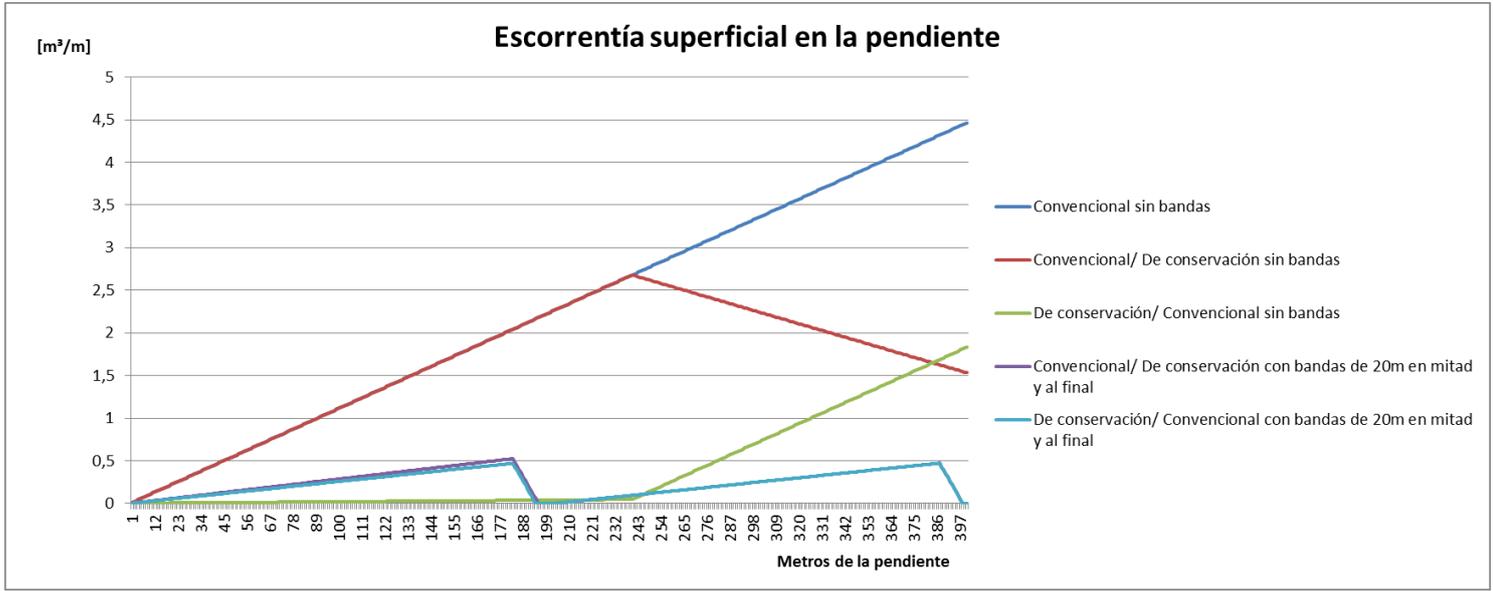
Mittel schluffiger sand (Areno limoso medio) → **Franco arenoso**

#### EROSIÓN PRODUCIDA EN LA PENDIENTE



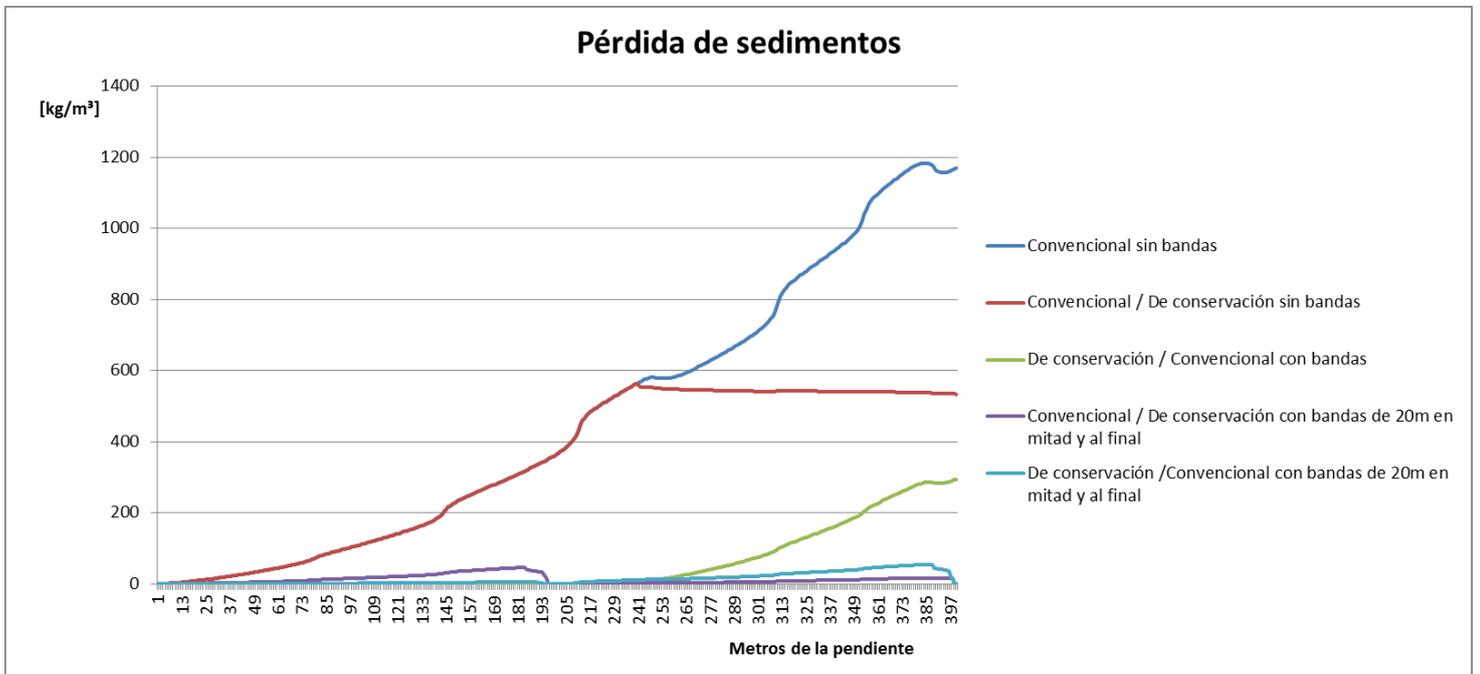
**Figura 22:** Medida de la erosión producida en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3.

### ESCORRENTÍA SUPERFICIAL



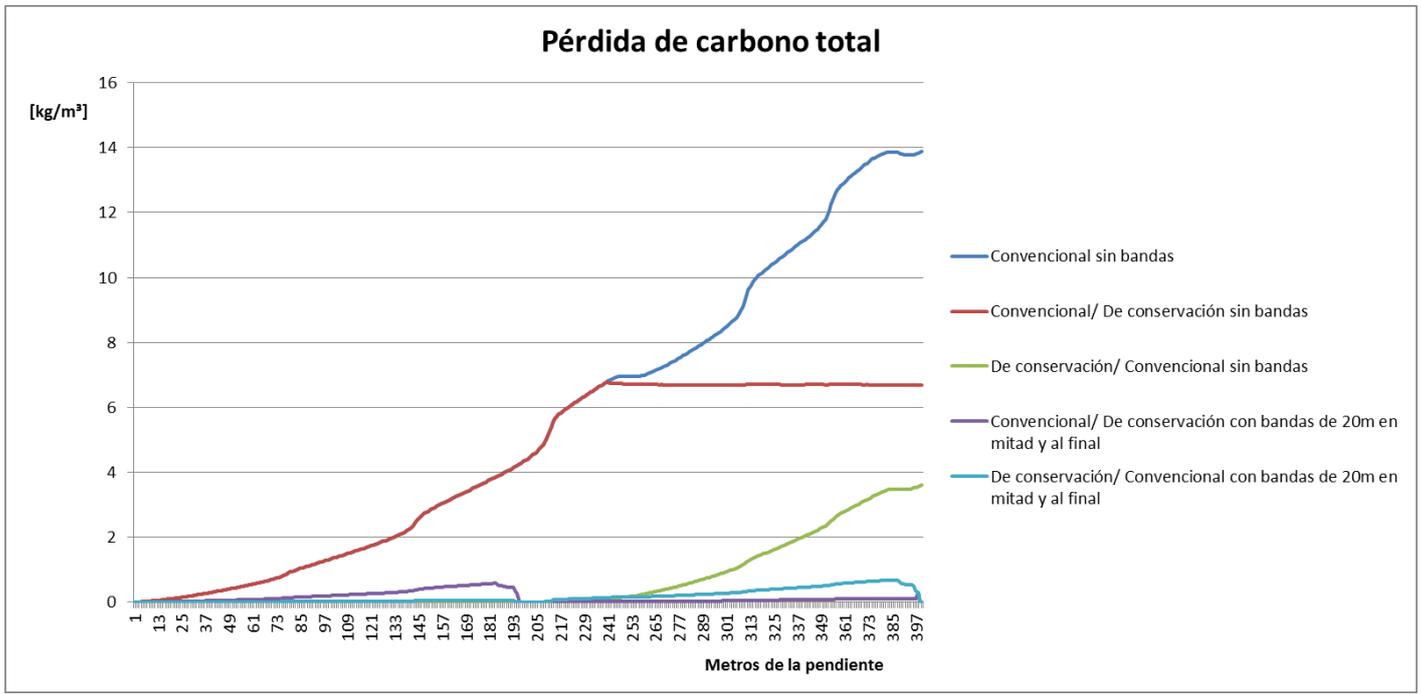
**Figura 23:** Medida de la escorrentía superficial en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3.

### PÉRDIDA DE SEDIMENTOS



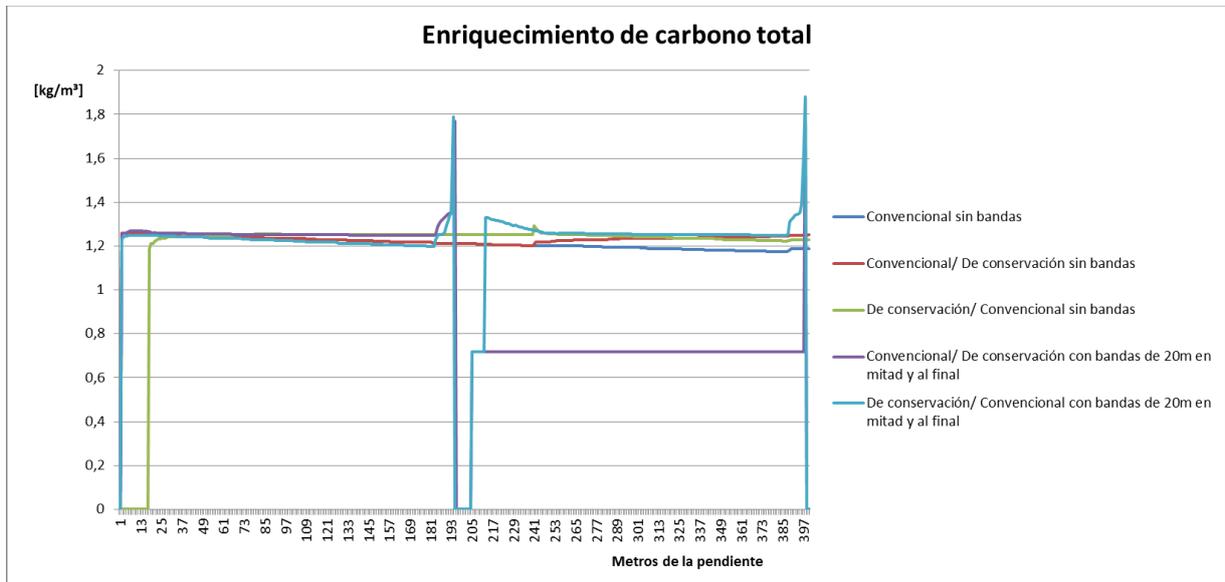
**Figura 24:** Medida de la pérdida de sedimentos total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3.

### PÉRDIDA DE CARBONO TOTAL



**Figura 25:** Medida de la pérdida de carbono total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3.

### ENRIQUECIMIENTO DE CARBONO



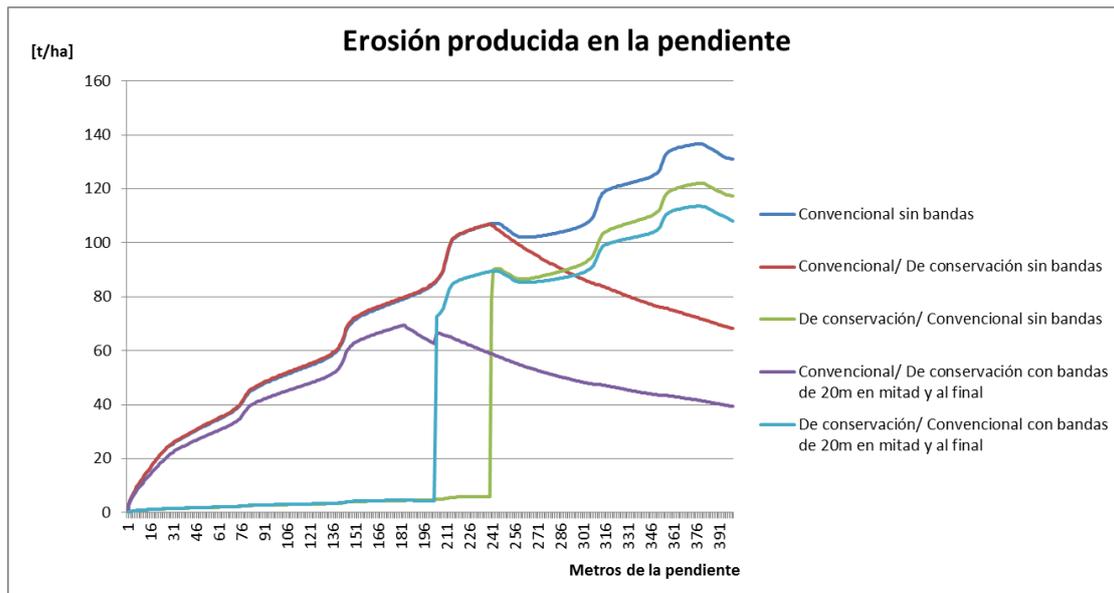
**Figura 26:** Medida del enriquecimiento de carbono en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3.

**BRASIL**

**UT 3**

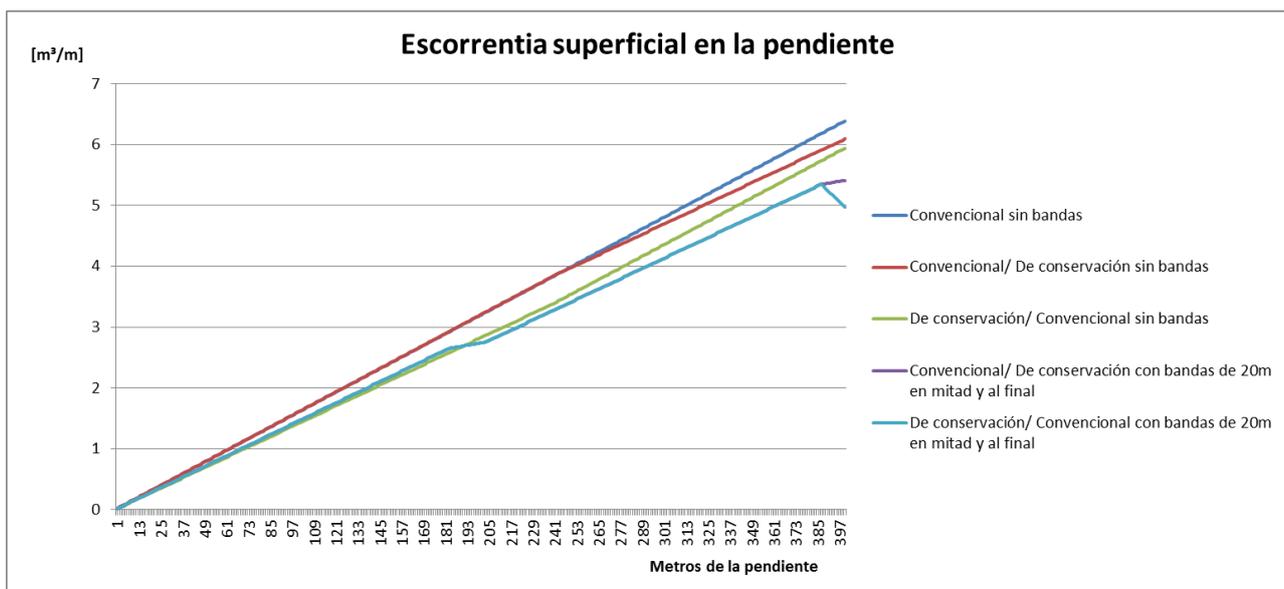
Mittel toniger schluff (Arcillo limoso medio) → **Franco limoso**

**EROSIÓN PRODUCIDA EN LA PENDIENTE**



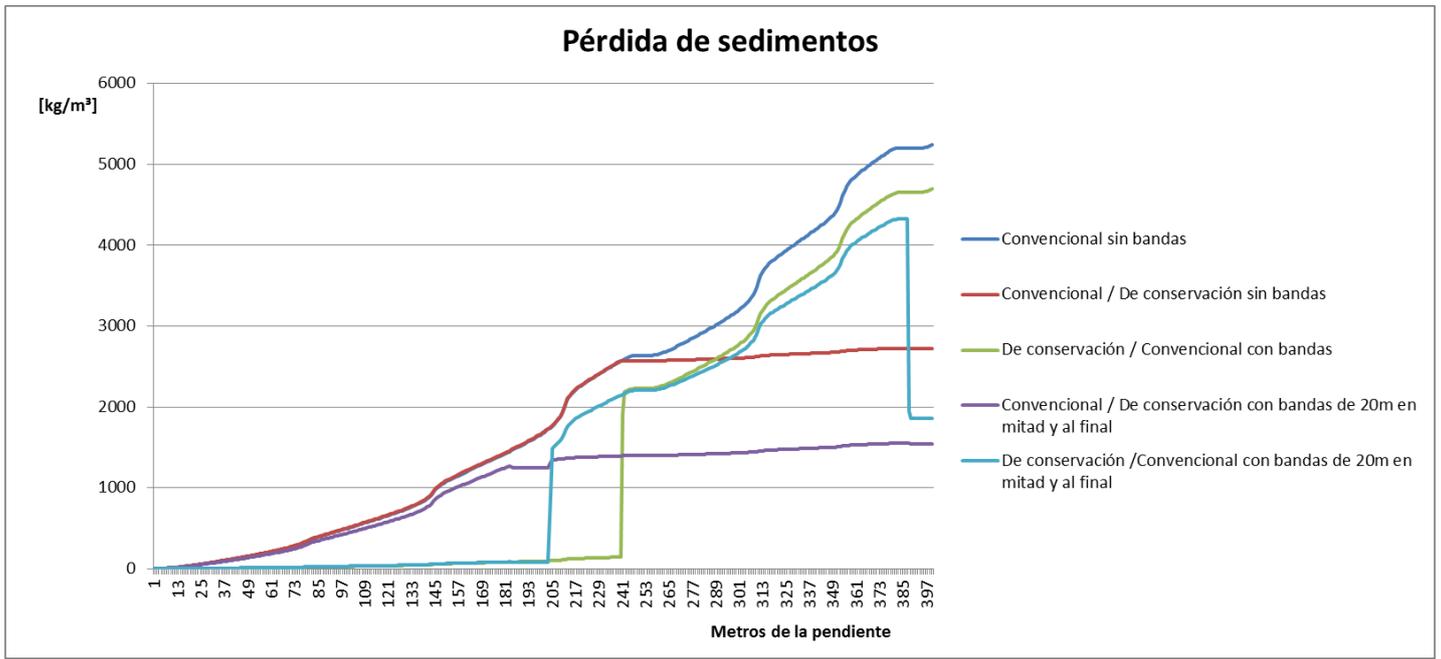
**Figura 27:** Medida de la erosión producida en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3.

**ESCORRENTÍA SUPERFICIAL**



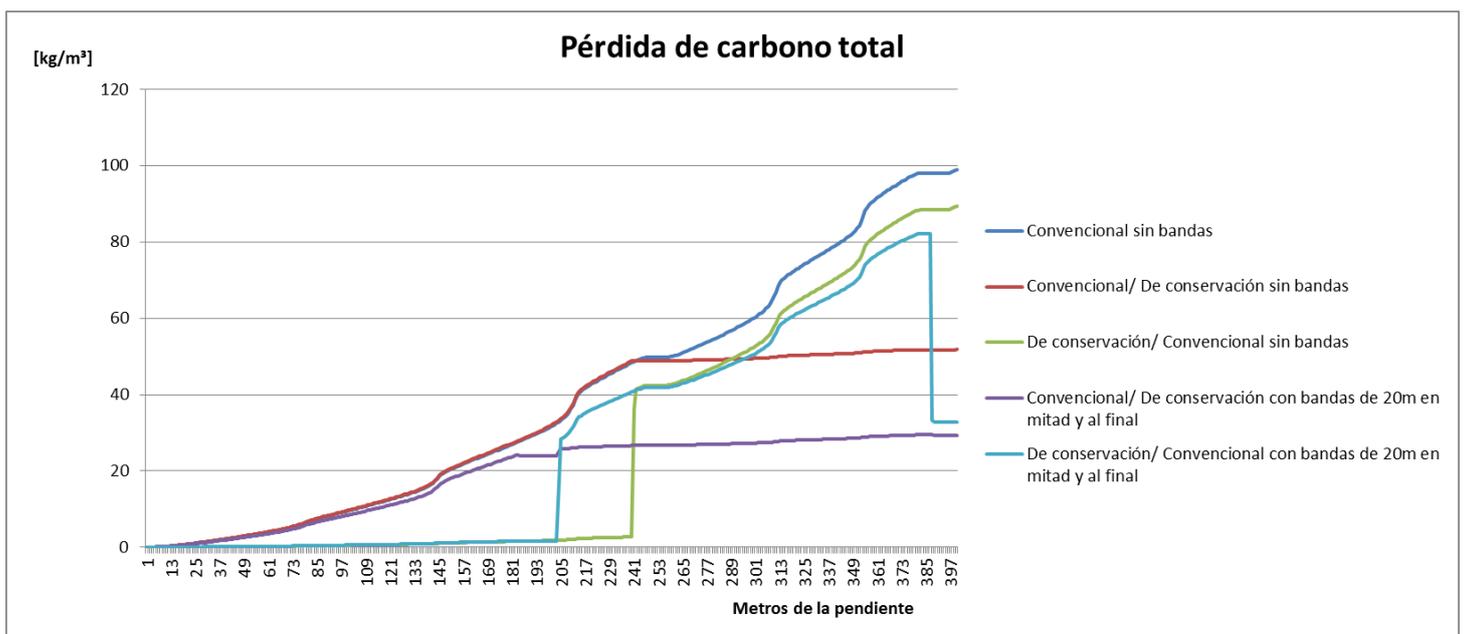
**Figura 28:** Medida de la escorrentía superficial en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3.

## PÉRDIDA DE SEDIMENTOS



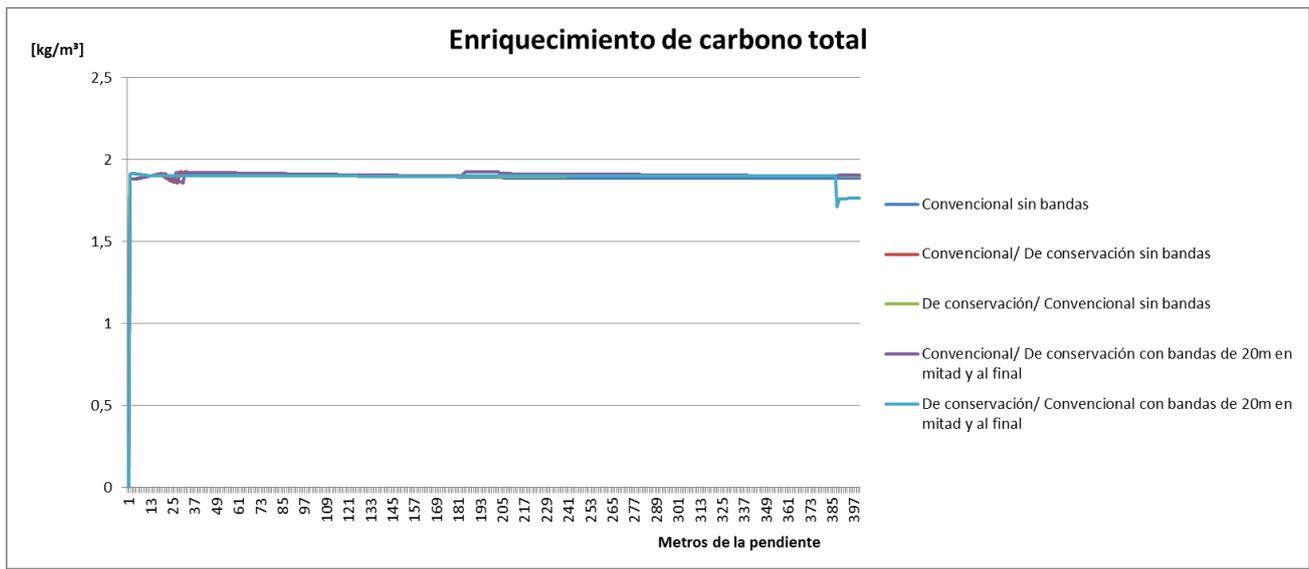
**Figura 29:** Medida de la pérdida de sedimentos total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3.

## PÉRDIDA DE CARBONO TOTAL



**Figura 30:** Medida de la pérdida de carbono total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3.

## ENRIQUECIMIENTO DE CARBONO

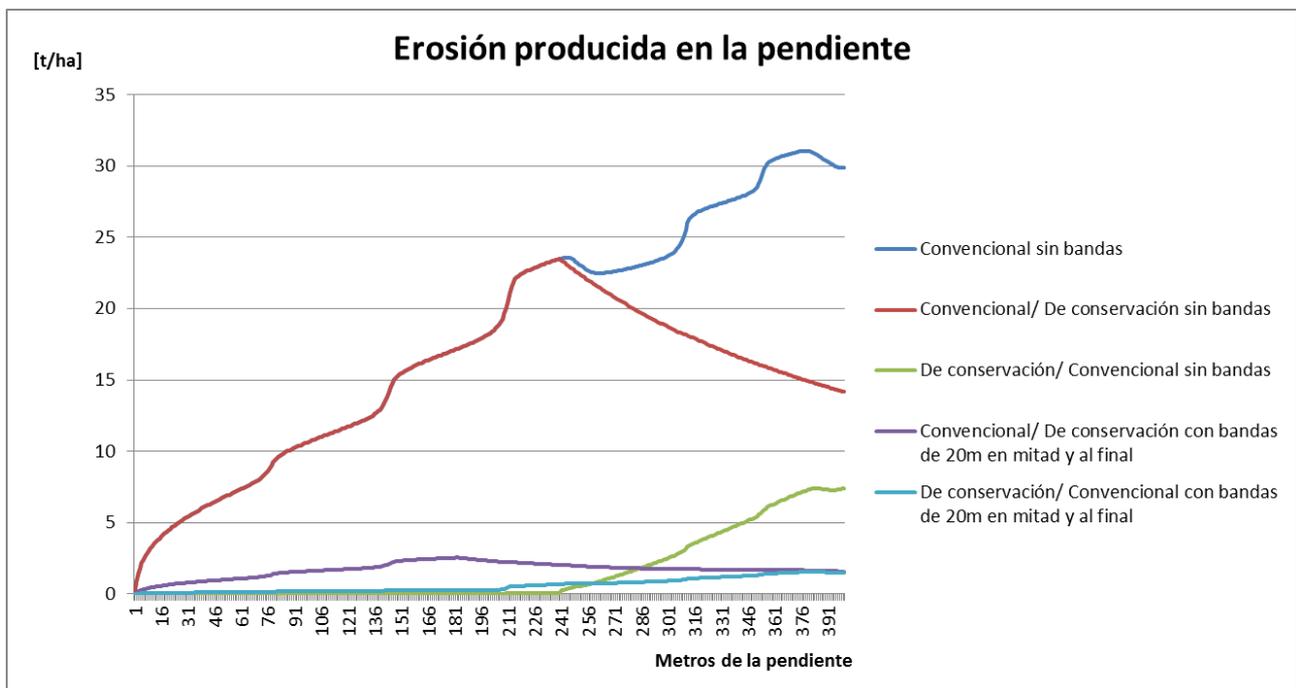


**Figura 31:** Medida del enriquecimiento de carbono en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en UT3.

## SU 3

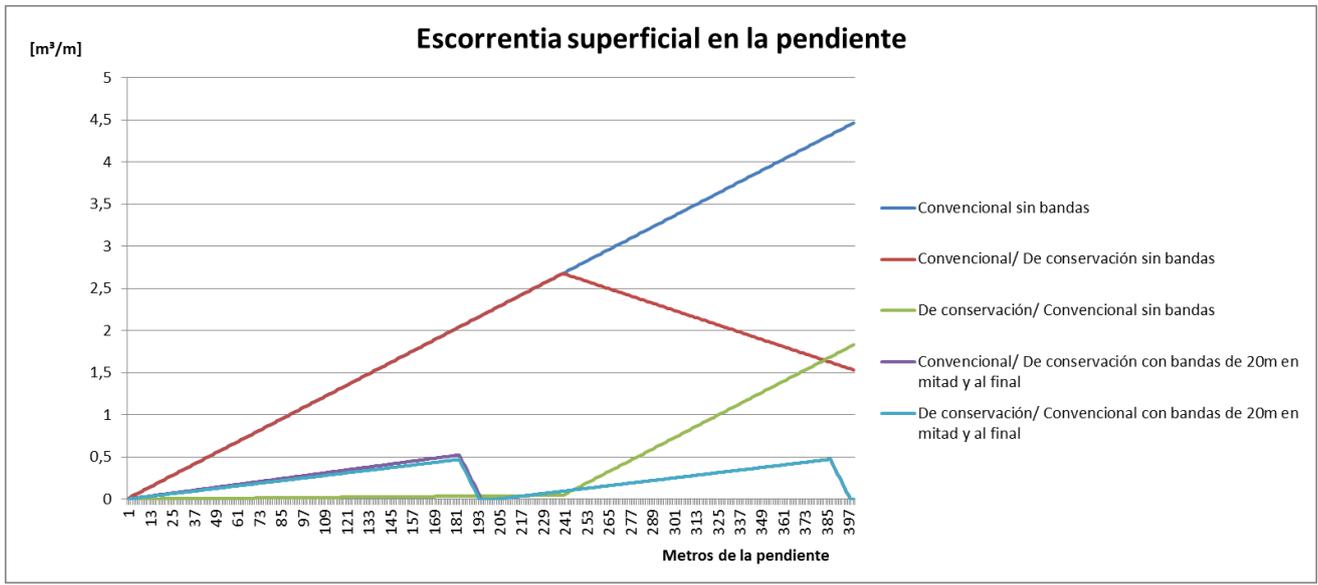
Mittel schluffiger sand (Areno limoso medio) → **Franco arenoso**

## EROSIÓN PRODUCIDA EN LA PENDIENTE



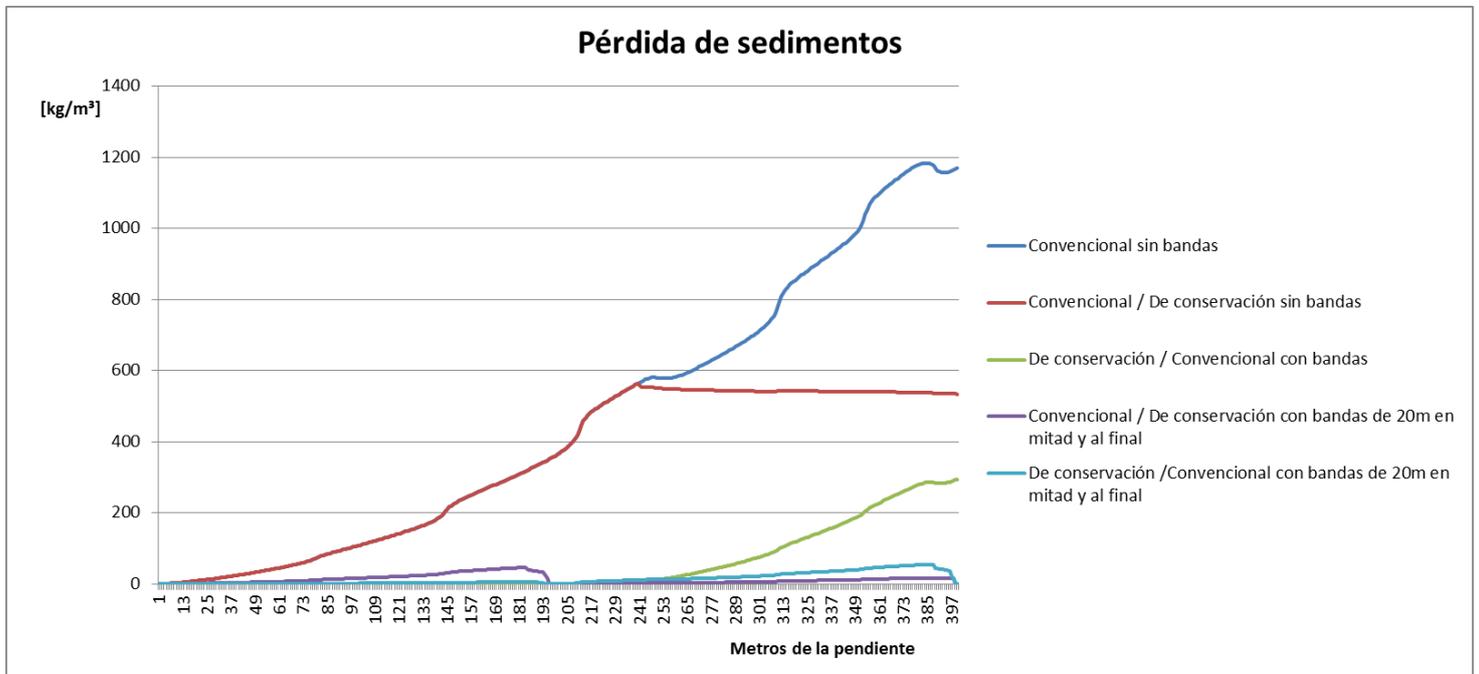
**Figura 32:** Medida de la erosión producida en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3.

### ESCORRENTÍA SUPERFICIAL



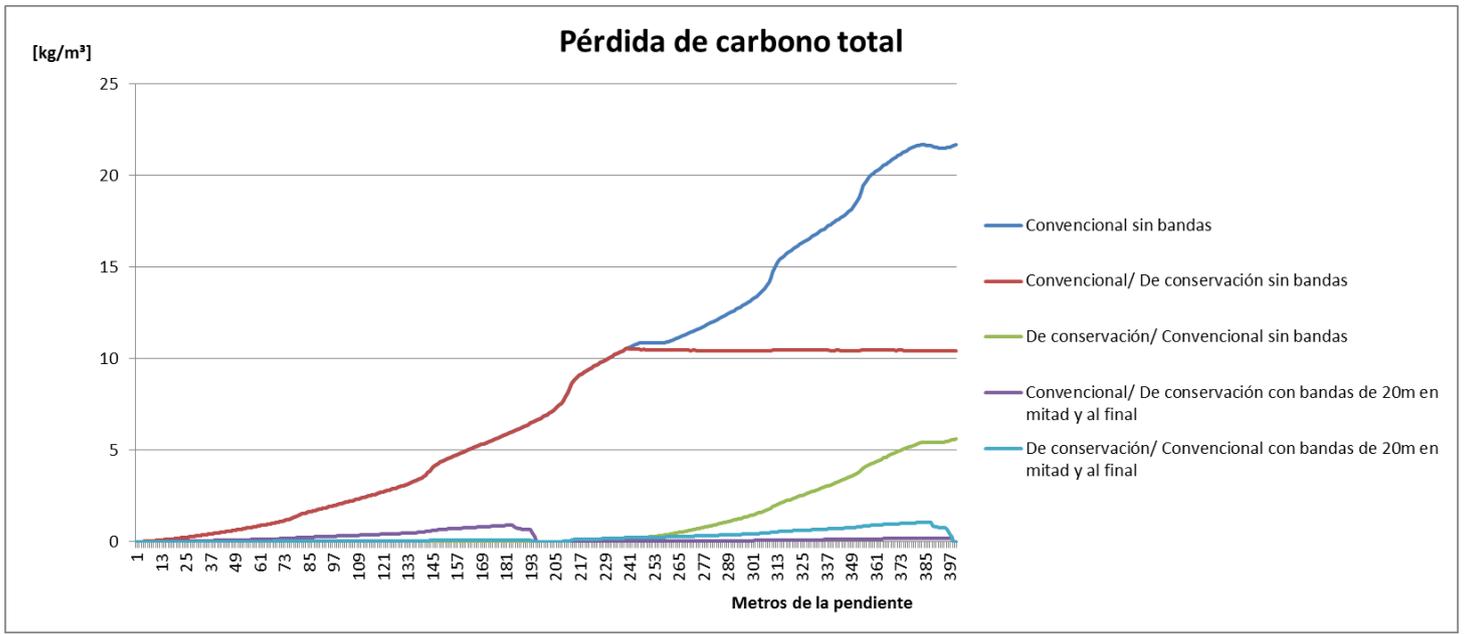
**Figura 33:** Medida de la escorrentía superficial en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3.

### PÉRDIDA DE SEDIMENTOS



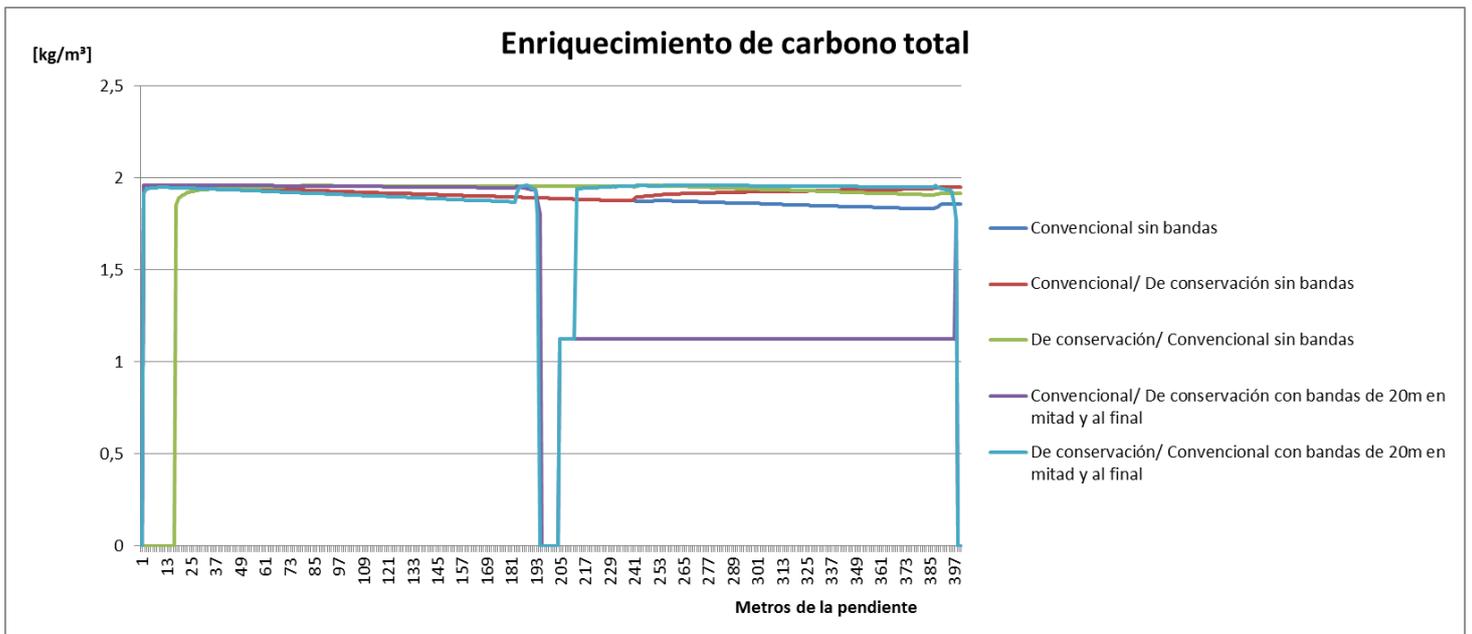
**Figura 34:** Medida de la pérdida de sedimentos total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3.

### PÉRDIDA DE CARBONO TOTAL



**Figura 35:** Medida de la pérdida de carbono total en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3.

### ENRIQUECIMIENTO DE CARBONO



**Figura 36:** Medida del enriquecimiento de carbono en la pendiente en diferentes tipos de manejo de suelo en SU3.

## 5- DISCUSIÓN

Analizando las gráficas (Figs. 17-36) que muestran los datos pertenecientes a un suelo franco limoso (UT3) y un suelo franco arenoso (SU3) de manera global, se observa claramente una serie de patrones que se enumeran a continuación:

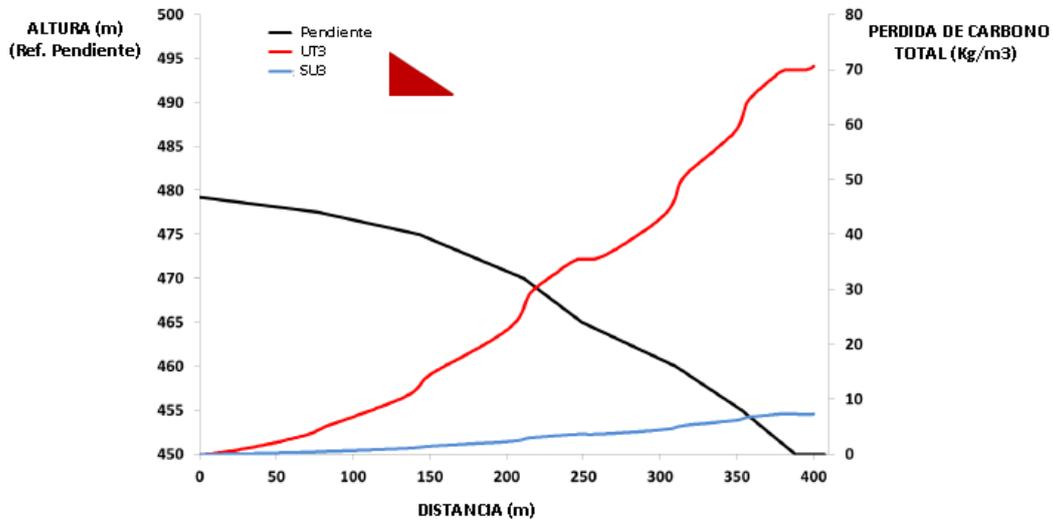
- La erosión, obviamente, irá aumentando conforme nos alejamos de la parte más alta de la pendiente. Pero la clave de este estudio es reflejar cómo influyen los cultivos de conservación, así como las bandas de amortiguación. Viéndose como en el suelo UT3 (Franco limoso), cuando se pasa de un cultivo de conservación a uno convencional, la erosión aumenta de 3-4 t/ha a unas 90 t/ha aprox; así como también ocurre a la inversa, el cambio de un cultivo convencional inicial a uno de conservación posterior, reduce drásticamente la erosión producida incluso al encontrarse en una zona crítica debido a la fuerza de la escorrentía por la acción de la pendiente. Otro dato a destacar es que tanto en las simulaciones de Alemania como en las de Brasil, los valores son casi idénticos.
- Respecto a la escorrentía superficial, se observa claramente como aumentará cuanto más distancia recorra sobre la pendiente, viéndose el efecto interesante de como en un suelo franco limoso ni los cultivos de conservación ni las bandas vegetales amortiguarán apenas nada la cantidad de  $m^3$  de agua/m que corre por la pendiente y en un suelo franco arenoso el empleo de dichas bandas de vegetación amortiguadoras harán que sea casi nulo el volumen de agua escurrida en dicha zona, para volver a aumentar en cuanto terminan los 10 – 20 – 30 o 40 metros de banda de vegetación, así como los cultivos de conservación también reducirán notoriamente el volumen de agua discurrida por la superficie de la pendiente. En este caso pasa como en el anterior, los valores en Alemania y Brasil son casi idénticos.

- Si analizamos la pérdida de sedimentos a lo largo de la pendiente, observaremos que se verá condicionada según el tipo de cultivo empleado y la presencia o ausencia de bandas de vegetación, siendo bastante mayor en cultivos convencionales y sin bandas de vegetación (En el caso de suelos franco limosos).

Estos son los resultados generales acerca de las simulaciones realizadas, pero en definitiva, el estudio se realizó para analizar más en detalle la pérdida de carbono y el enriquecimiento de carbono total, por lo que en este apartado nos detendremos algo más en cada caso concreto para ver cómo se han visto afectados dichos parámetros en función del tipo de suelo, cultivo...

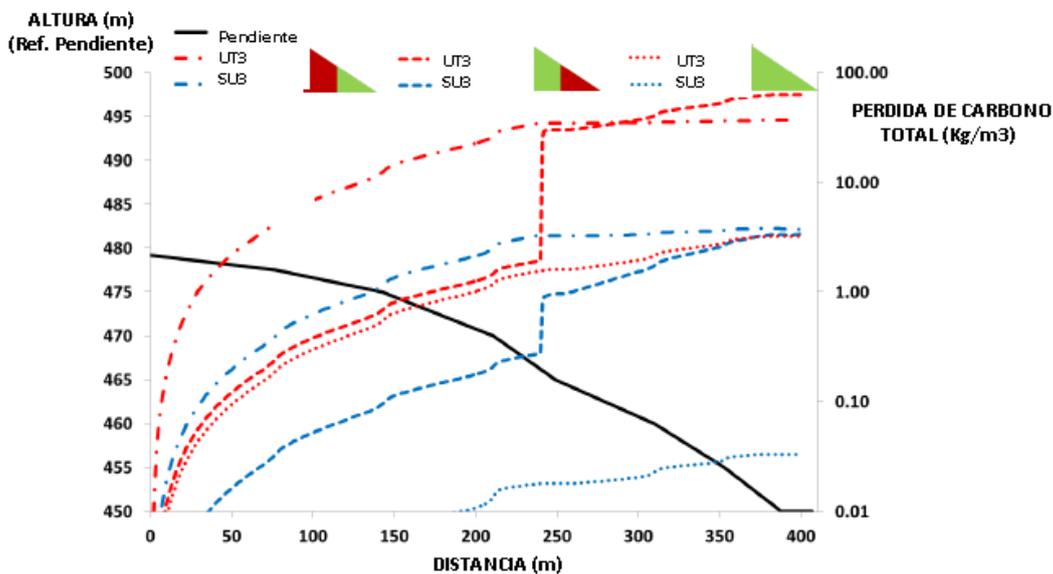
- PERDIDA Y ENRIQUECIMIENTO DE CARBONO





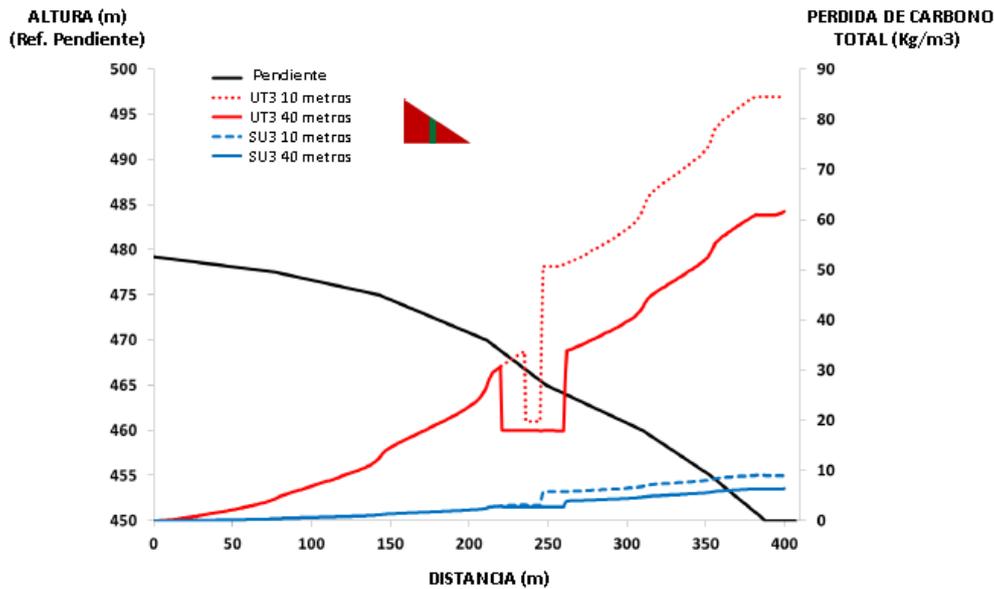
**Figura 37:** Gráfico que muestra la pérdida de carbono total según el tipo de suelo estudiado en un cultivo convencional.

En este gráfico (Fig. 37) se observa claramente, como hubo unas pérdidas de carbono 10 veces mayor en el suelo franco limoso que en el suelo franco arenoso.



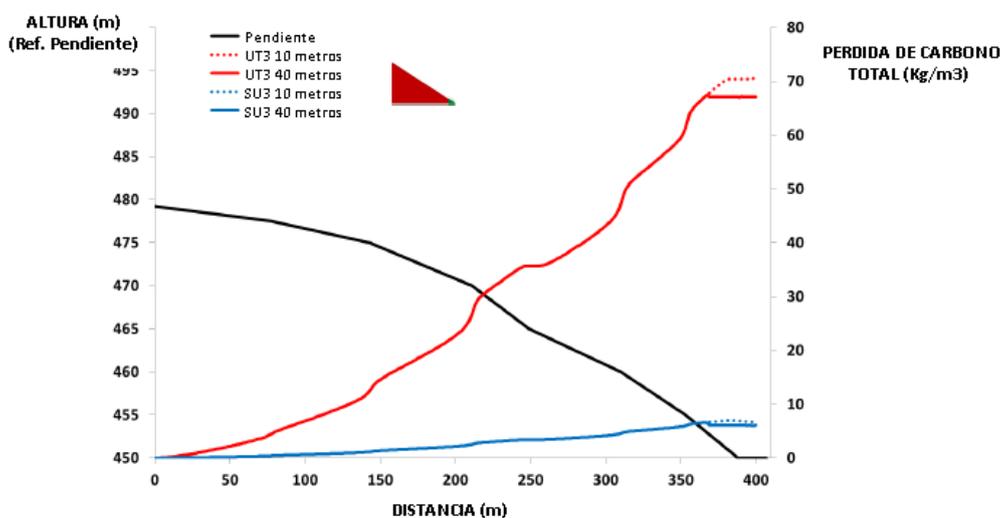
**Figura 38:** Gráfico que muestra la pérdida de carbono total según el tipo de suelo estudiado en diferentes tipos de manejo de suelo.

Aquí (Fig. 38) podemos observar como el cultivo de conservación uniforme es el más eficaz en lo que a reducción de pérdidas de carbono se refiere. Por otro lado, en el caso de labranza mixta se observa claramente como la secuencia es crucial, causando siempre más pérdidas de carbono los cultivos convencionales.



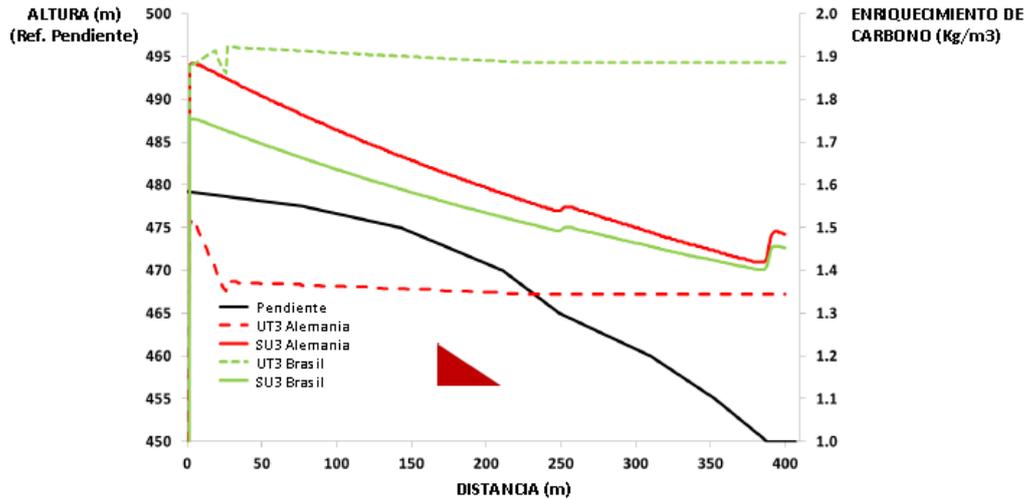
**Figura 39:** Gráfico que muestra la pérdida de carbono total según el tipo de suelo estudiado en un manejo convencional con bandas de vegetación tanto de 10 como de 40 metros en mitad de la pendiente.

En este caso (Fig. 39), las bandas de amortiguación disminuyen la pérdida de carbono debido a la retención de sedimentos en ellas, pero solo en la sección que abarque, lo que produce un efecto negativo inmediatamente después, aumenta la capacidad de transporte de dichos sedimentos después de dichas bandas de vegetación al desprenderse de ellos. En definitiva, estas bandas intermedias no son unas herramientas excesivamente adecuadas para la prevención de la pérdida de carbono.



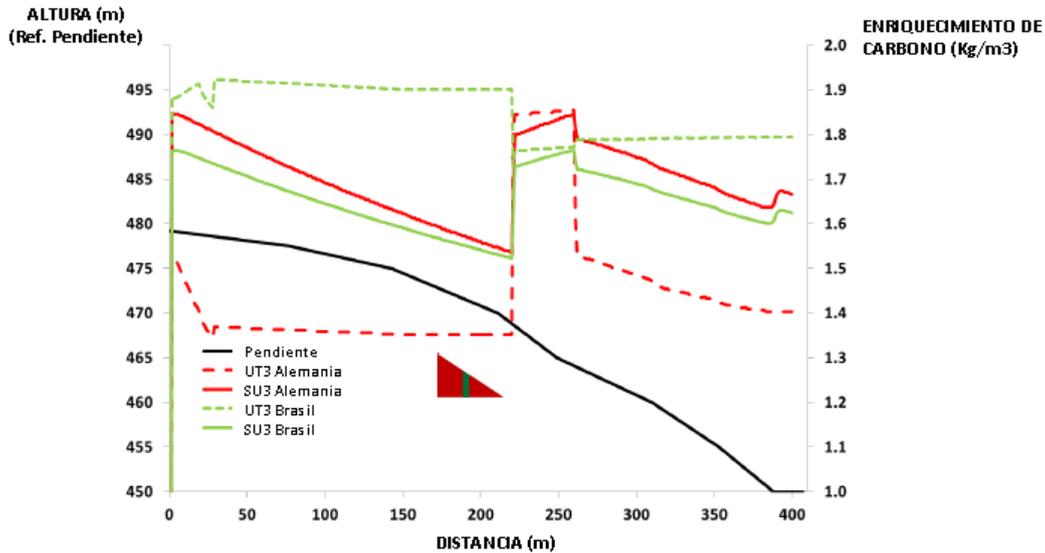
**Figura 40:** Gráfico que muestra la pérdida de carbono total según el tipo de suelo estudiado en un manejo convencional con bandas de vegetación tanto de 10 como de 40 metros al final de la pendiente.

Aquí (Fig. 40) podemos ver como las bandas de amortiguación al final de la pendiente pueden amortiguar la pérdida de carbono entre un 2-5% en un suelo franco limoso y entre un 12-18 en un suelo franco arenoso.



**Figura 41:** Gráfico que muestra el enriquecimiento de carbono total según el tipo de suelo estudiado en un manejo convencional comparándose con datos de Alemania y Brasil.

En la (Fig. 41) observamos cómo después de unos pocos metros, el suelo franco limoso (UT3) permanece constante mientras que en el suelo franco arenoso (SU3) decrece un poco. Se observa también claramente, la diferencia notoria que existe entre los suelos francos limoso de Alemania y Brasil, teniendo estos últimos un mayor enriquecimiento de carbono.



**Figura 42:** Gráfico que muestra el enriquecimiento de carbono total según el tipo de suelo estudiado en un manejo convencional con bandas en mitad comparándose con datos de Alemania y Brasil.

Aquí (Fig. 42) se puede observar claramente, como las bandas de vegetación provocan un aumento de enriquecimiento de carbono al deshacerse de las partículas de arena carbonizadas.

### **MÉTODOS DE MANEJO DE SUELO Y PÉRDIDA DE CARBONO.**

En relación con el balance de Carbono, con el modelo se ha podido comprobar que la pérdida de carbono es menor en los suelos con manejo de conservación debido a una serie de parámetros condicionantes como son:

- La resistencia a la erosión es mayor que en los manejos convencionales (conservación -  $0,0025 \text{ Kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  y convencional -  $0,001 \text{ Kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
- La rugosidad es también mayor en las prácticas de conservación ( $0,024 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$  frente a los  $0,015 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$  de convencional)
- La cobertura vegetal es del 30% en conservación, mientras que en convencional es del 0%.
- Por último, el factor de corrección Skin, suele ser en conservación de 3 y en convencional de 1.

Todos estos factores, que son siempre mayores en las prácticas de conservación, hace que la erosión producida en el terreno (Pérdida de carbono) sea menor en las prácticas de conservación.

Por otro lado, y aunque no se comprueba con el modelo, todos los sistemas basados en la adición de residuos y/o no-labranza, tienden a acumular más carbono en el suelo, comparado con la pérdida que se produce hacia la atmósfera. Al principio de las técnicas de conservación el contenido de materia orgánica del suelo es incrementado mediante la descomposición de las raíces de la contribución de los residuos vegetales sobre la superficie, esto provoca que dicho material orgánico es descompuesto muy lentamente, obviamente, su liberación a la atmósfera también ocurrirá lentamente. Todo esto es beneficioso en la lucha contra las emisiones de gases “efecto invernadero” para mitigar los impactos del calentamiento global.

En todos los datos muestreados, se observa claramente este suceso, como por ejemplo la Fig. 43:



**Figura 43:** Gráfico que muestra la pérdida de carbono en diferentes tipos de suelo según el tipo de manejo empleado (convencional o de conservación).

### **BANDAS DE VEGETACIÓN Y PÉRDIDA DE CARBONO.**

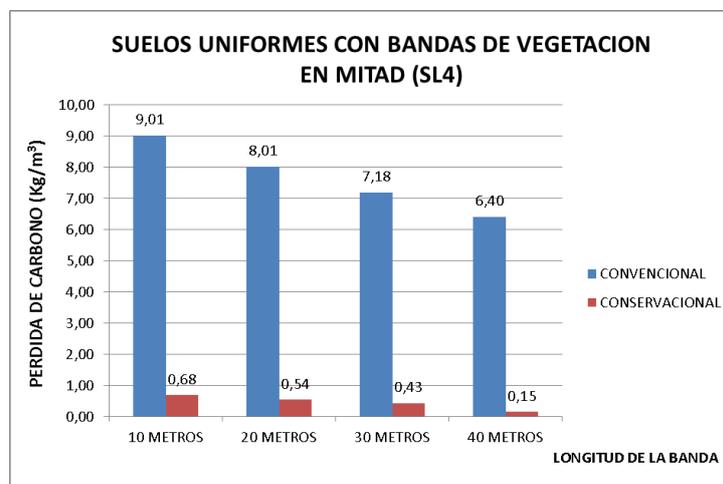
En cuanto a la relación pérdida de Carbono/ amplitud de las bandas de vegetación, en primer lugar, se debe saber que las cubiertas o bandas vegetales en los cultivos tienen como objetivos comprobados con el modelo:

- Reducir drásticamente las pérdidas de suelo causada por la erosión.
- Aumentar la infiltración de agua en el suelo, especialmente en periodos intensos de lluvia.
- Reducir la pérdida de carbono de los suelos.

Además de (no comprobados con el modelo):

- Reducir la evaporación del agua del suelo en la primavera y verano.
- Aumentar la biodiversidad: Conservan la meso fauna del suelo (artrópodos, lombrices) y las poblaciones de aves que nidifican en el suelo.

Tras muestrear y analizar los datos, se observa que a mayor amplitud (en metros) de las cubiertas vegetales menor será el carbono perdido, sirviendo como claro ejemplo la Fig. 44:



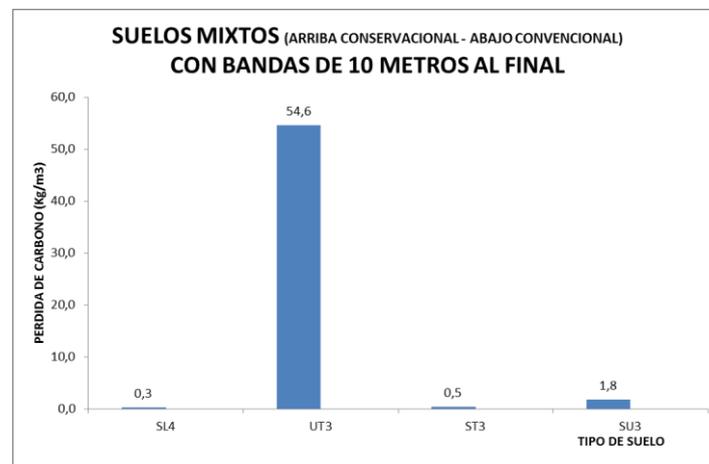
**Figura 44:** Gráfico que muestra la pérdida de carbono en un suelo SL4 con diferentes tamaños de bandas de vegetación en mitad de la pendiente y diferentes tipos de manejo (convencional o de conservación).

### **EL LIMO Y LA PÉRDIDA DE CARBONO.**

En relación con la presencia de limo, los suelos que contienen, de manera inicial, más cantidad de limo son más erosionables, en los casos estudiados, los suelos de tipo UT3 son los que contienen más limo, por lo que se aprecia claramente (Figs. 45 y 46) como pierden mucho más carbono que los demás:



**Figura 45:** Gráfico que muestra la pérdida de carbono en suelos uniformes sin bandas de vegetación.

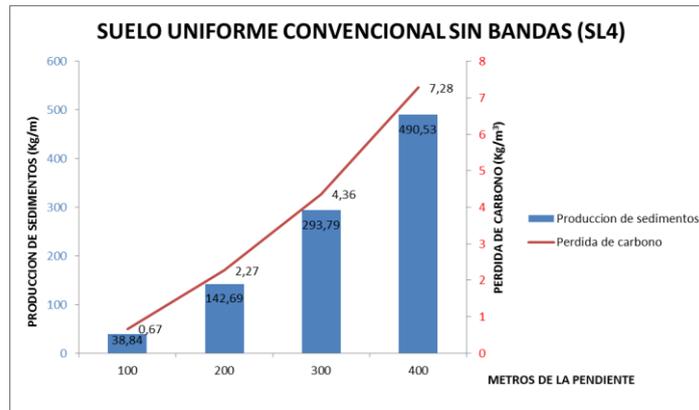


**Figura 46:** Gráfico que muestra la pérdida de carbono en suelos mixtos con bandas de vegetación de 10 metros al final.

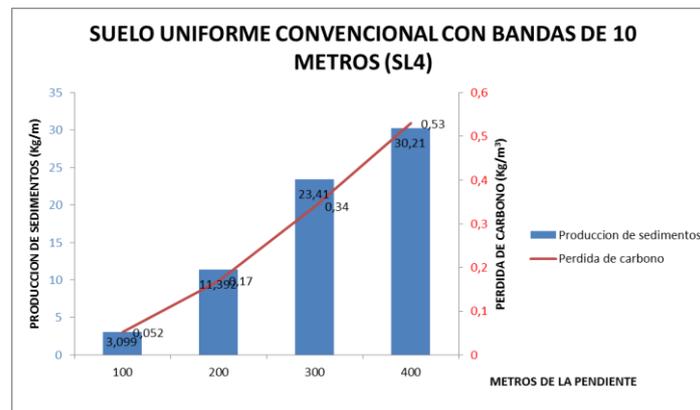
### **PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y PÉRDIDA DE CARBONO**

Después de estudiar y analizar los datos, se observa claramente como la relación que existe entre la producción de sedimentos y la pérdida de carbono es directamente proporcional, sin importar el tipo de manejo de suelo que se haga (convencional/de conservación) y si hay o no bandas de vegetación.

Esto se debe a que cuanto mayor producción de sedimentos haya, más erosionable será el terreno, por lo que será más fácil que pierda dicho carbono, a causa de una mayor erosión (Figs. 49 y 50).



**Figura 47:** Gráfico que muestra la producción de sedimentos y la pérdida de carbono en suelos SL4 sin bandas de vegetación a lo largo de la pendiente.



**Figura 48:** Gráficos que muestran la producción de sedimentos y la pérdida de carbono en suelos SL4 con bandas de vegetación a lo largo de la pendiente.

### **PÉRDIDA DE ARENA, LIMO Y ARCILLA CON ENRIQUECIMIENTO DE CARBONO**

Como se observa claramente en los datos analizados, el enriquecimiento de carbono en los suelos está altamente afectado por la mayor o menor cantidad de limo que haya, es decir, cuando un suelo contiene mucho limo, se producirá mucha erosión lo que provocará que no se acumule el carbono en el suelo y que si escape a la superficie (Fig. 51). En cambio, cuando las cantidades de limo no son excesivamente altas, el carbono consigue mantenerse en el suelo debido a la poca erosibilidad de la arena y la arcilla (Fig. 52).

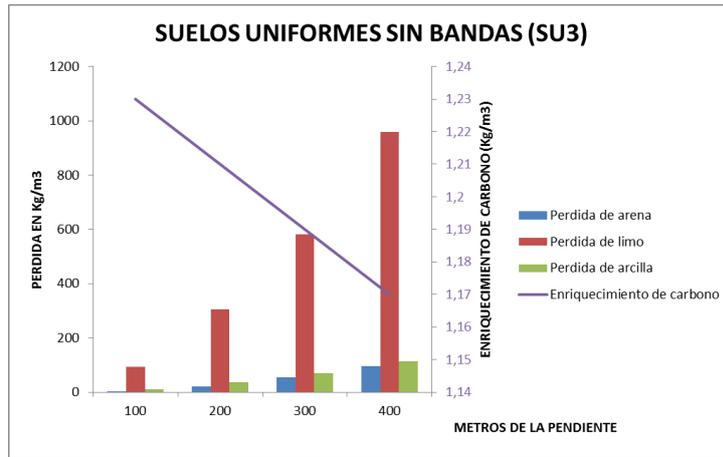


Figura 49: Gráfico que muestra la relación entre la pérdida de arena, limo y arcilla con el enriquecimiento de carbono decreciente.

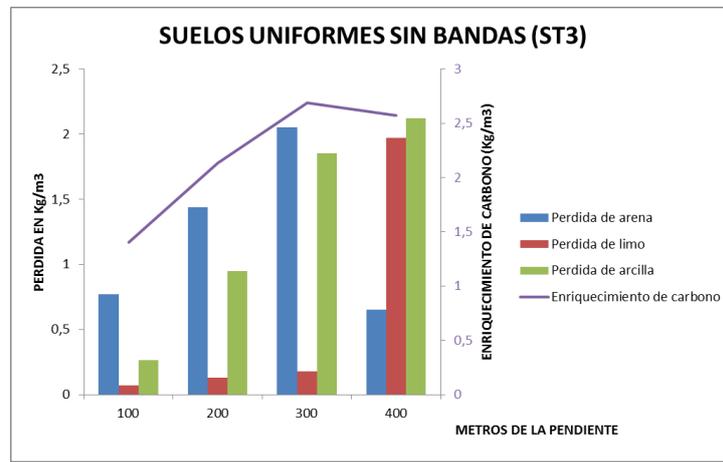


Figura 50: Gráfico que muestra la relación entre la pérdida de arena, limo y arcilla con el enriquecimiento de carbono creciente.

**¿BAJO QUE FACTORES DE DISTRIBUCION (ALEMAN O BRASILEÑO) ES MAS ELEVADA LA PERDIDA DE CARBONO Y EL ENRIQUECIMIENTO?**

Para Alemania los factores de distribución de carbono son:

ARCILLA	LIMO	ARENA
3,4	1	0,4

Para Brasil los factores de distribución de carbono son:

ARCILLA	LIMO	ARENA
1,3	2,045	0,635

En la mayoría de los casos se puede observar cómo, dependiendo del tipo de suelo muestreado, la pérdida y enriquecimiento de carbono será más elevado en Brasil o Alemania. Para ser más exactos, cuando estudiamos los suelos tipo SL4 y ST3, la pérdida y enriquecimiento de carbono será más elevado en Alemania, mientras que para los suelos UT3 y SU3 será más elevado en Brasil.

Esto es debido a los factores de distribución de arcilla, limo y arena propios de cada suelo. Los valores iniciales de ARCILLA – LIMO – ARENA son, respectivamente, para cada suelo:

- SL4 → 14 – 25 – 61
- UT3 → 14 – 77 – 10
- ST3 → 21 – 7 – 73
- SU3 → 4 – 33 – 63

Sabiendo que, en los factores de distribución, Brasil los tiene más altos tanto en Limo como en arena, los suelos donde la proporción de limo y arena sean mayores, se verá más afectado, por eso en los suelos UT3 y SU3, hay mayor pérdida de carbono en Brasil.

Y por esta misma razón, pero a la inversa, en Alemania hay mayor pérdida de carbono en los suelos SL4 y ST3, porque se encuentran más condicionados por la mayor presencia de arcilla y su factor de distribución es más alto (3,4 frente a 1,3)

## 6- CONCLUSIONES

- a. Las técnicas de cultivo conservacionistas son más eficientes en la acumulación/enriquecimiento de carbono, por lo que se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.
  
- b. Los valores de la pérdida y enriquecimiento de carbono dependen de la proporción de arena – limo – arcilla, junto al factor de distribución de carbono, que posea el suelo inicialmente.
  
- c. La ubicación y el tamaño de las bandas de vegetación son dos variables esenciales que determinarán la mayor o menor atenuación de la pérdida de carbono así como el enriquecimiento de carbono a lo largo de la pendiente.

## 7- BIBLIOGRAFÍA

- Jacinthe, P.A., Lal, R., Owens, L.B. & Hothem, D.L. (2004). Transport of labile carbon in runoff as affected by land use and rainfall characteristics. *Soil and Tillage Research* 77, 111–123.
- Lázaro, D., Schmidt, J., Schindewolf, M., Seher, W. & Sopt, R., (2014). Process based modelling of soil organic carbon redistribution on landscape scale.
- Michael, A., Schmidt, J. und Schmidt, W., (1996). *EROSION 2D ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser - Band II Parameterkatalog*, Freiberg.
- Polyakov, V.O. & Lal, R., (2008). Soil organic matter and CO<sub>2</sub> emissions as affected by water erosion on field runoff plots. *Geoderma* 143, 216–222.
- Ritchie, J. C., Mccarty, G. W., Venteris, E. R. & Kaspar, T. C. (2007). Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape. *Geomorphology* 89(1-2): 163-171.

- Rodríguez, A. R., Guerra, A., Arbelo, C., Mora, J. L., Gorrin, S. P. & Armas, C. (2004). Forms of eroded soil organic carbon in andosols of the Canary Islands (Spain). *Geoderma* 121(3-4): 205-219.
- Roose, E. J. L., Feller, C., Barthès, B. & Stewart, B.A. (2006), *Soil Erosion and Carbon Dynamics*, CRC Press, 376 pp, Boca Raton, FL.
- Schindewolf, M. (2011). Prozessbasierte Modellierung von Erosion, Deposition und partikelgebundenem Nähr- und Schadstofftransport in der Einzugsgebiets- und Regionalskala.
- Schmidt, J., (1991). A mathematical Model to Simulate Rainfall Erosion. *Catena Supplement*, Vol. 19.
- Schmidt, J., (1996). Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter, landwirtschaftlicher Nutzflächen. *Berliner Geographische Abhandlungen*.
- Strickland, T.C., Truman, C.C., & Frauenfeld, B.(2005). Variable rainfall intensity effects on carbon characteristics of eroded sediments from two coastal plain ultisols in Georgia. *Journal of Soil and Water Conservation* 60, 142–147.
- Toy, T.J., G.R. Foster & K.G. Renard. (2002). *Soil erosion: Processes, prediction, measurement, and control*. John Wiley and Sons.
- Truman, C.C., Strickland, T.C., Potter, T.L., Franklin, D.H. & Bosch, D.D. (2007). Variable rainfall intensity and tillage effects on runoff, sediment, and carbon losses from a loamy sand under simulated rainfall. *Journal of Environmental Quality* 36, 1495–1502.
- Werner, M., 1995. GIS-orientierte Methoden der digitalen Relieffanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten. *Dissertation Thesis*, Freie Universität Berlin, Berlin.