



PROYECTO CSIC I+D 2010
“EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS
POS-COSECHA EN CUENCAS FORESTADAS”

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
FACULTAD DE CIENCIAS



DICIEMBRE DE 2013

EQUIPO TÉCNICO

Facultad de Ingeniería - Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental

MSc. Ing. Jimena Alonso

Bach. Martín Scavone

Facultad de Ciencias - Centro de Investigaciones Nucleares

MSc. Lic. Paola Audicio

MSc. Lic. Mirel Cabrera

Lic. Marcos Tassano

Lic. Emilia Rezzano

Facultad de Agronomía - Departamento de Suelos y Aguas

MSc. Ing. Agr. Leticia Martínez

RESUMEN DEL PROYECTO

La demanda mundial por pulpa y papel, así como otros usos de la madera incrementaron la plantación de bosques con especies de rápido crecimiento, convirtiendo a las plantaciones de Eucalyptus desde la segunda mitad del S XX, en el principal cultivo para obtención de productos madereros. Como respuesta a esta demanda y con el incentivo de una política forestal orientada al desarrollo del sector, en Uruguay se generó un gran crecimiento de la superficie ocupada con forestación comercial lo cual ha instalado en nuestro país la controversia respecto a los efectos de este cambio de uso del suelo sobre la cantidad y calidad de los recursos hídricos, la degradación de los suelos, la reducción de la biodiversidad y afectación del paisaje, aspectos demográficos y socioculturales e incluso sobre la extranjerización de la tierra. Es así que la necesidad de profundizar la investigación vinculándola a las condiciones ambientales, climáticas y productivas locales está establecida.

Este proyecto, ejecutado entre 2011 y 2013, financiado en el marco de la convocatoria 2010 a Proyectos de Investigación y Desarrollo de la Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad de la República, tuvo como objetivo evaluar la producción de sedimentos en cuencas forestadas, contrastando distintos manejos. Para alcanzarlo se utilizó la técnica del radionucleido ambiental Cesio -137, como indicador de la redistribución de suelos y con ello de la erosión debida al cambio de uso del suelo. Dicha técnica fue aplicada por primera vez en cuencas forestadas del Uruguay, con el objetivo de evaluar el cambio en la producción de sedimentos debido a la cosecha de Eucalyptus.

El estudio se desarrolló en dos cuencas similares sometidas a la cosecha completa durante el año 2010. En un sitio de referencia elegido, que se considera sin erosión y en las dos cuencas se cuantificó la actividad del radionucleido ^{137}Cs en el perfil del suelo. El muestreo diseñado se realizó antes y después de la cosecha en ambas cuencas. El inventario total medido en el sitio de referencia fue de 437 Bq/m^2 . Los sitios que presentaron inventarios menores indicaron erosión mientras que los que presentaron actividad acumulada mayor indicaron sedimentación, en general éstos últimos fueron los puntos en la zona baja de ambas cuencas.

Los modelos de conversión actividad de ^{137}Cs -erosión reportaron, para los niveles de actividad de ^{137}Cs medidos, en la etapa pos-cosecha tasas de erosión del orden del doble de las tasas del período pre-cosecha. En particular el modelo de conversión basado en los procesos de difusión y migración del ^{137}Cs en el suelo, reporta los valores que pueden considerarse más cercanos a la realidad 1.8 y 3.9 t/ha. año respectivamente. Sin embargo debido a las limitaciones en la cantidad de puntos muestreados estos valores deben considerarse simplemente como una tendencia.

En cuanto a la modelación hidrológica de los escurrimientos y de la producción de sedimentos en la cuenca, el modelo SHETRAN fue implementado en una de las cuencas para ambas condiciones de cobertura vegetal: monte adulto de Eucalyptus y monte cosechado con residuos en superficie. En ambos casos se obtuvieron resultados satisfactorios, observándose un aumento en el coeficiente de escorrentía simulada pos-cosecha de 121% respecto a las condiciones pre-cosecha y un aumento en la producción media anual de sedimentos de 61 %, como resultados del mismo cambio de cobertura. Las diferencias producidas se deben exclusivamente al cambio en los parámetros del modelo inherentes a la vegetación, permaneciendo los restantes parámetros incambiados.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2. ANTECEDENTES	6
3. ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DE BASE	7
3.1 CUBIERTA VEGETAL	8
3.2 SUELOS Y GEOLOGÍA	8
3.3 INFORMACIÓN DE BASE	12
4. METODOLOGÍA	14
4.1 MUESTREO Y PROCESAMIENTO DE MUESTRAS	14
4.2 MEDICIÓN DE ACTIVIDAD DE CS	15
4.3 MODELOS DE CONVERSIÓN	16
4.3.1 MODELO DE PERFIL DE DISTRIBUCIÓN	16
4.3.2 MODELO DE DIFUSIÓN Y MIGRACIÓN.....	17
4.4 MODELO DE EROSIÓN USLE/RUSLE	18
4.5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA	19
4.5.1 MÓDULO DE TRANSPORTE DE AGUA	20
4.5.2 MÓDULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	20
5. ACTIVIDADES, AVANCES Y DIFICULTADES DEL PROYECTO	23
5.1 ACTIVIDADES REALIZADAS EN EL PROYECTO	23
5.2 AVANCES OBTENIDOS	27
5.3 DIFICULTADES ENFRENTADAS EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO	28
6. RESULTADOS	29
6.1 MEDICIÓN DE ACTIVIDAD DE CS	29
6.2 MODELOS DE CONVERSIÓN	39
6.3.1 MODELO DE PERFIL DE DISTRIBUCIÓN	40
6.3.2 MODELO DE DIFUSIÓN Y MIGRACIÓN.....	40
6.3 MODELO DE EROSIÓN USLE/RUSLE	41
6.4 MODELACIÓN HIDROLÓGICA	42
6.4.1 MÓDULO DE TRANSPORTE DE AGUA	44
6.4.2 MÓDULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	45
7. CONCLUSIONES Y ACTIVIDADES FUTURAS	49
8. BIBLIOGRAFÍA	51
 Anexo: PUBLICACIONES	 49

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la explotación de los recursos naturales, en particular suelos y aguas, para la producción de alimentos y bienes aumenta constantemente con el crecimiento demográfico. La demanda por pulpa y papel, así como otros usos de la madera incrementaron la plantación de bosques con especies de rápido crecimiento, convirtiendo las plantaciones de *Eucalyptus* en el principal cultivo para obtención de productos madereros, situación que se agudiza con la crisis energética de las últimas décadas. Nuestro país como tradicional productor de bienes primarios respondió a estas demandas, que en un principio fueron extranjeras, con una política de promoción de los recursos forestales del país e incentivo del desarrollo de la forestación industrial que se concretó cuando en 1987 el gobierno uruguayo aprobó la ley Nº 15.939. Fué así que se generó un gran crecimiento de la superficie ocupada con forestación comercial principalmente *Eucalyptus* y *Pinus* que aumentó desde 45.000 hectáreas a fin de 1980 a casi 900.000 hectáreas a fines de 2010, según el registro de la Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca.

Desde que la forestación comercial con especies exóticas, en particular *Eucalyptus*, se ha convertido en el principal cambio de uso del suelo en nuestro país, la controversia respecto a sus efectos sobre la cantidad y calidad de los recursos hídricos y la degradación de los suelos está instalada, y con ella la necesidad de profundizar la investigación vinculándola a las condiciones ambientales, climáticas y productivas locales. A esto se suma la necesidad de establecer indicadores de manejo forestal sustentable, compromiso que deben asumir las empresas y productores forestales y requisito indispensable además, en los procesos de certificación de sus productos.

1.1 Objetivo General

El objetivo planteado para este proyecto es evaluar los efectos de la cosecha en microcuencas forestadas con eucaliptos, contrastando distintos manejos. Para alcanzarlo se plantea la utilización de la técnica del Cesio -137 como indicador de la redistribución de suelos y con ello de la erosión debida al cambio de uso de la tierra.

1.2 Objetivos Específicos

1. Mantener y ampliar el programa de monitoreo ambiental existente, comprendiendo en particular las 2 microcuencas actualmente instrumentadas.
 - a) Continuar con las medidas continuas de: precipitación, caudal, y variables meteorológicas.
 - b) Realizar muestreos de suelo post-cosecha y durante la reforestación de ambas microcuencas.
 - c) Completar el banco de datos existente, ampliando el rango de variabilidad pluviométrica y caudales asociados e incorporando la información obtenida de las determinaciones de Cs¹³⁷ en suelo.
2. Evaluar los efectos de la cosecha bajo distintas condiciones antecedentes de contenido de humedad de suelo, sobre el recurso agua y suelo a escala de microcuenca.
3. Implementar modelos numéricos de transporte de agua y sedimentos en las dos microcuencas.
4. Avanzar en el establecimiento de indicadores hidrolambientales relativos a la producción de sedimentos para el manejo sustentable de plantaciones forestales.

2. ANTECEDENTES

En relación a la erosión de suelos y a la producción de sedimentos, la actividad forestal presenta durante la etapa de crecimiento y desarrollo de la plantación, presenta efectos positivos en lo que a la conservación de los suelos y potencial de erosión se refiere. Esto se debe a la acción de retención ejercida por las raíces, y al aumento en el déficit hídrico de los suelos (debido a la mayor evapotranspiración) que permite reducir la presión de saturación de los poros y con ello reduce el efecto de deslizamiento de los suelos (Bathurst et al., 2007). Es así que la atención debe centrarse en dos momentos de la actividad forestal: la preparación del sitio para la plantación y, al final del ciclo, la cosecha.

Las técnicas desarrolladas para la medición directa de los sedimentos producidos por la erosión de suelos presentan múltiples dificultades en cuanto a su implementación, mantenimiento y costos de operación. Adicionalmente algunas de las técnicas de medición a la salida de la cuenca presentan la desventaja de integrar en el sedimento medido tanto el que se produce por erosión de los suelos como el que proviene del arrastre del propio cauce.

Las estimaciones de producción de sedimentos se logran mediante modelos empíricos simples que relacionan la producción de sedimento con características de la cuenca: área, pendiente, clima y vegetación que son empleados tanto para la evaluación del riesgo potencial y actual de erosión como para la planificación en cuencas hidrográficas. El modelo USLE (Wischmeier y Smith, 1978) y su versión revisada RUSLE (Renard et al., 1997) es la herramienta más utilizada para el cálculo de la erosión laminar. En Uruguay se ha trabajado extensamente en la calibración y validación de sus parámetros bajo las condiciones locales (Puentes, 1981; García Préchac, 1992; García Préchac et al., 1996; García Préchac et al., 1997; García Préchac et al., 1999; Terra y García Préchac, 2001)

El uso de indicadores como los radionucleidos ambientales que permiten establecer tasas de erosión y sedimentación así como representar espacialmente la redistribución de suelo, comenzó hace más de 50 años. Los radionucleidos seleccionados con mayor recurrencia como trazadores de erosión son: Cesio 137 antropogénico, emitido a la atmósfera desde la década de 1950, fruto de las diversas pruebas atómicas, Plomo 210, natural, resultado del decaimiento del Uranio 238- y Berilio 7 –natural, proveniente de la radiación cósmica (Walling et al., 1999; Walling y He, 1999a, b; Zapata y García-Agudo, 2000).

Diversos estudios reseñados por Ritchie & Ritchie (2001) y Zapata (2002) mostraban desde la década de 1960 la correlación entre la pérdida de radionucleidos ambientales y la erosión de suelos. A nivel regional, específicamente en los países del Cono Sur, está difundido el empleo de técnicas de conteo de actividad de isótopos radioactivos, en particular ^{137}Cs y ^7Be (Schuller et al, 2003; Schuller et al, 2006; Schuller et al, 2010; JuriAyub et al, 2008; Pacini et al., 2010).

Si bien existían experiencias nacionales en la medición de la actividad de ese radionucleido en distintas zonas del Uruguay (CIN-Facultad de Ciencias y DINATEN-MIEM), hasta el momento del comienzo de este proyecto, no se había relacionado cuantitativamente dicha actividad con la tasa de erosión.

3. Área de Estudio e Información de base

Las microcuencas del establecimiento Santo Tomás se localizan en las proximidades de Algorta, departamento de Río Negro, sobre la Ruta 25 a 19 km de Guichón (Figura 1). Los cauces principales de ambas microcuencas (en adelante Santo Tomás 1 y Santo Tomás 2, son afluentes al Arroyo Don Esteban.

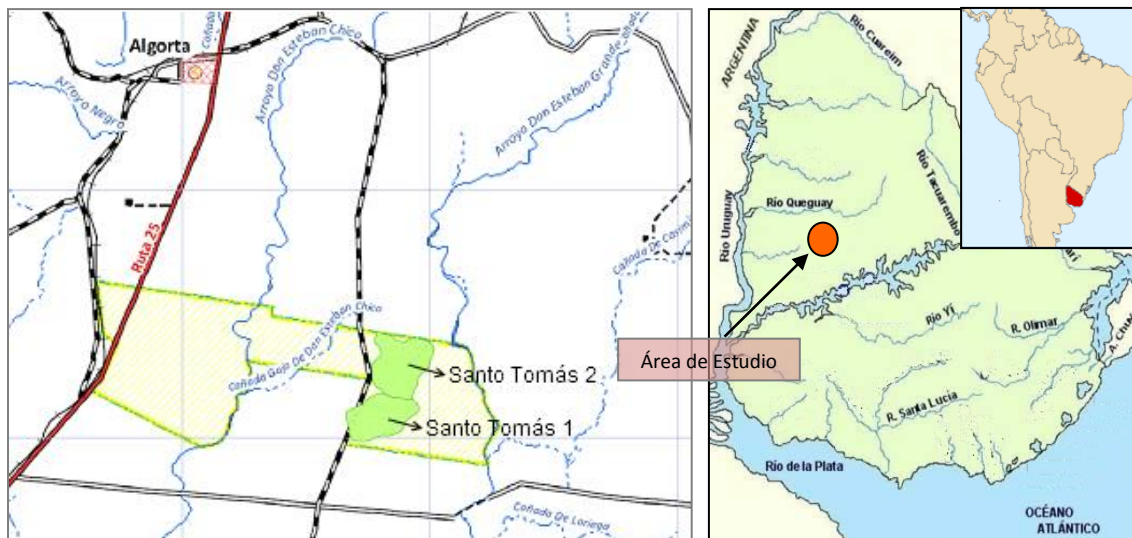


Figura 1- Localización del área de estudio

En la Tabla 1 se presentan las principales características hidrológicas de las microcuencas.

Tabla 1 - Características hidrológicas de las cuencas de estudio

Característica	Santo Tomás 1	Santo Tomás 2
Coordenadas del cierre (UTM Z21S)	467256, 6405398	
Área (has)	97	117
Long. Cauce (m)	1232	1477
Pendiente del cauce	1.0 %	0.9%
Pend media cuenca	3.8 %	3.5%
Tiempo de concentración (min)	25	31

3.1 Cubierta Vegetal

El predio de la microcuenca Santo Tomás fue un establecimiento ganadero hasta 1998 cuando se realizó la plantación forestal de *Eucalyptus globulus* como especie predominante. La plantación forestal cubrió el 77% de la superficie de la cuenca ST1 y el 80% de la ST2 como se aprecia en la Figura 2. Mientras que el área restante correspondía a cortafuegos y zonas de protección riparia con vegetación de pasturas nativas. La plantación de ST1 fue cosechada en condiciones de alta humedad en los suelos entre febrero y marzo de 2010 y la de ST2 entre los meses de setiembre y noviembre de 2010.

Posteriormente los restos de la cosecha fueron dispuestos en filas sobre las curvas originales de la plantación que siguen las curvas de nivel del terreno dejando el espacio entre las filas libre para la nueva plantación que fue establecida a fines del año 2011 en ambas microcuencas. La situación de cobertura vegetal actual con la replantación en ambas cuencas se aprecia en la Figura 3.

3.2 Suelos y Geología

En Santo Tomás los suelos predominantes corresponden a Planosoles Dístricos Ocrícos, a veces Melánicos y Argisoles Dístricos Ocrícos Abrúpticos, a veces Típicos. El color de los horizontes superiores es pardo grisáceo oscuro, la textura es arenoso franca y son de fertilidad baja e imperfectamente drenados. En las laderas de mayor convexidad y pendiente, los Planosoles Dístricos Ocrícos presentan mayor espesor de horizonte A, de color pardo grisáceo, textura arenosa y fertilidad muy baja. Como asociados, en laderas medias y bajas de pendiente máxima de 1%, existen Brunosoles Subéutricos, a veces Dístricos Típicos y Luvicos, son de color pardo muy oscuro, textura franco arenosa, fertilidad media y drenaje moderadamente bueno a imperfecto.

Se presenta el mapa de suelos de ambas cuencas en la Fig 4.

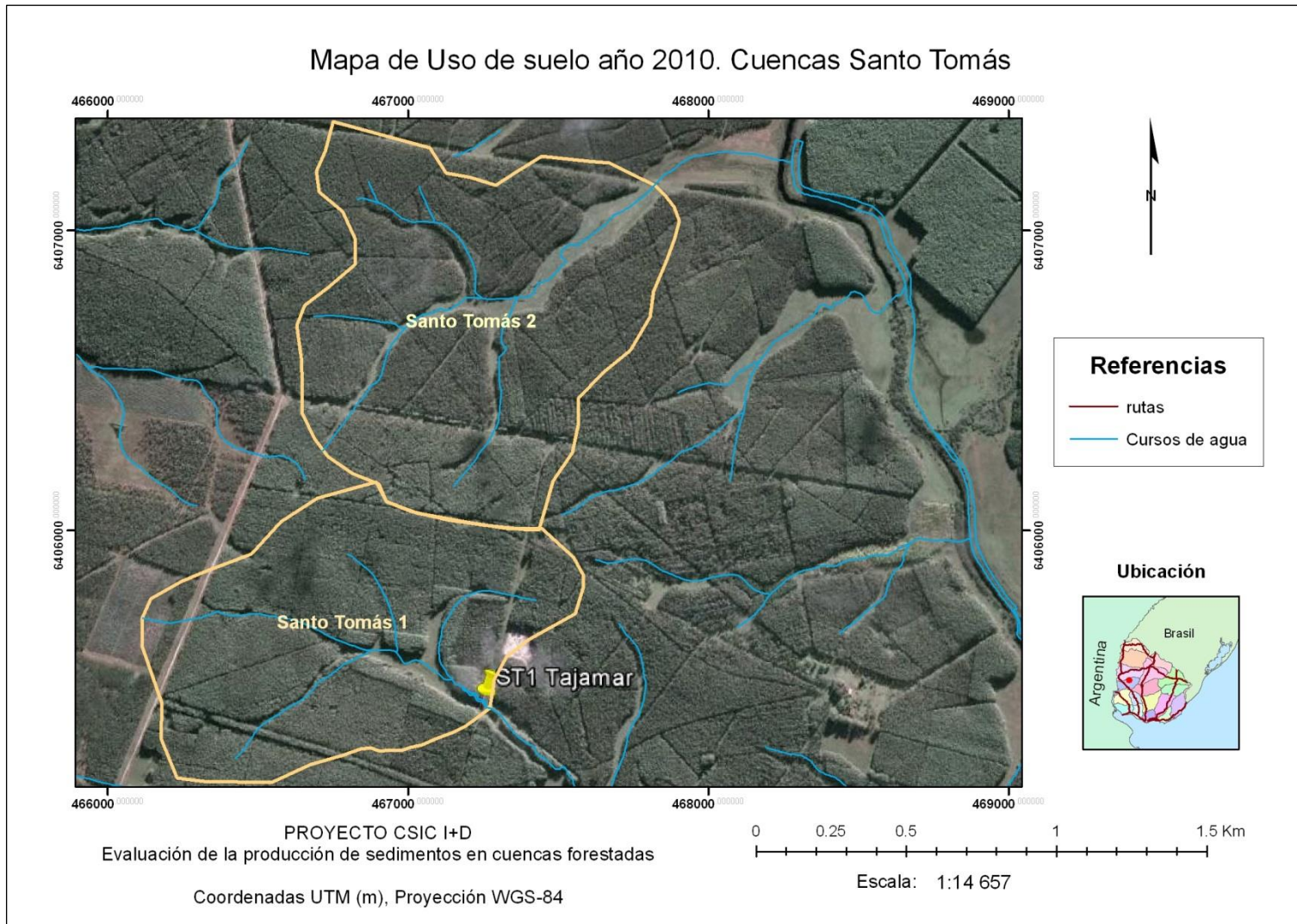


Figura 2- Plantación forestal adulta en las microcuencas, año 2010 (imagen Google Earth año 2007)

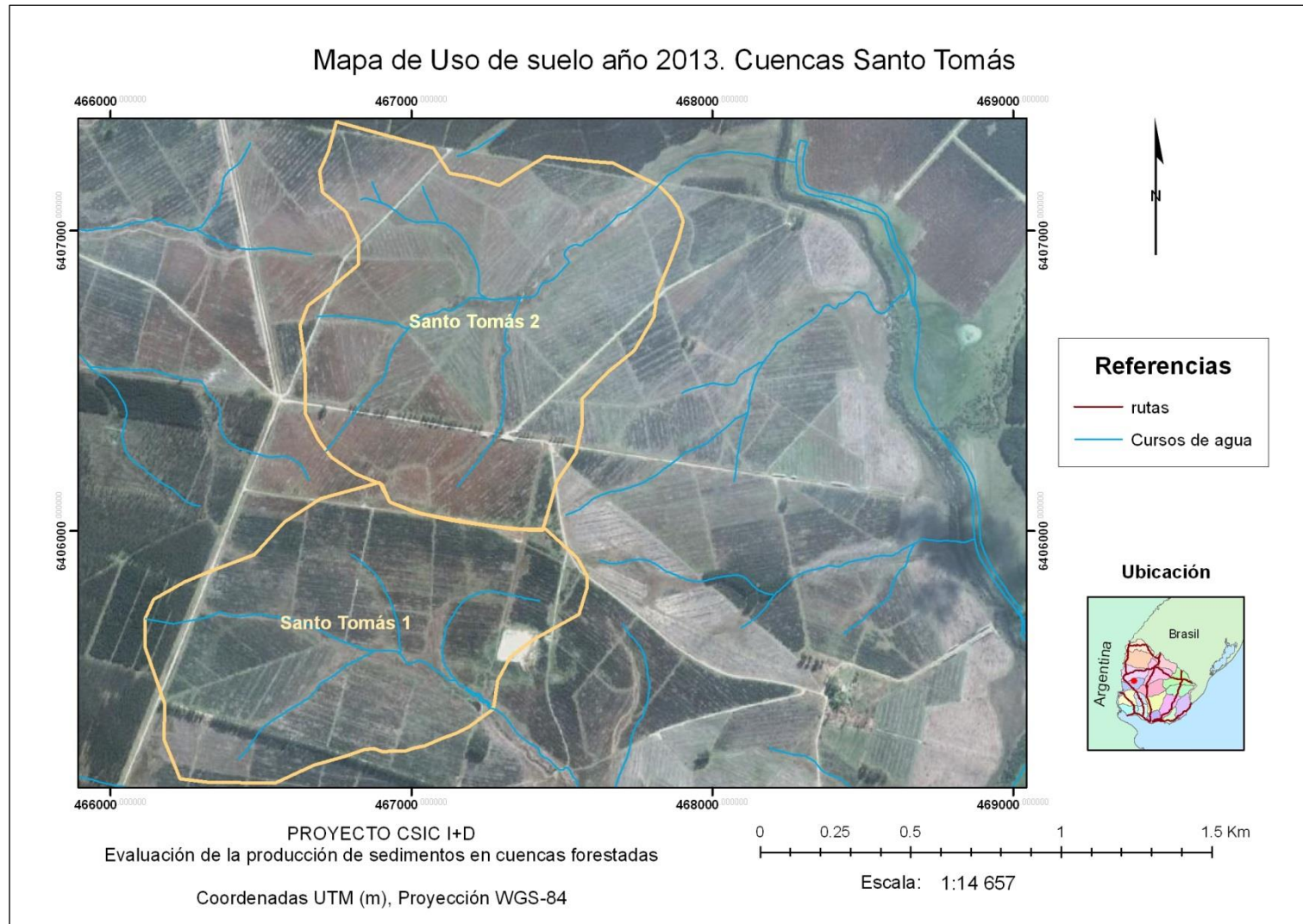


Figura 3- Replantación en las microcuencas (imagen Google Earth año 2013)

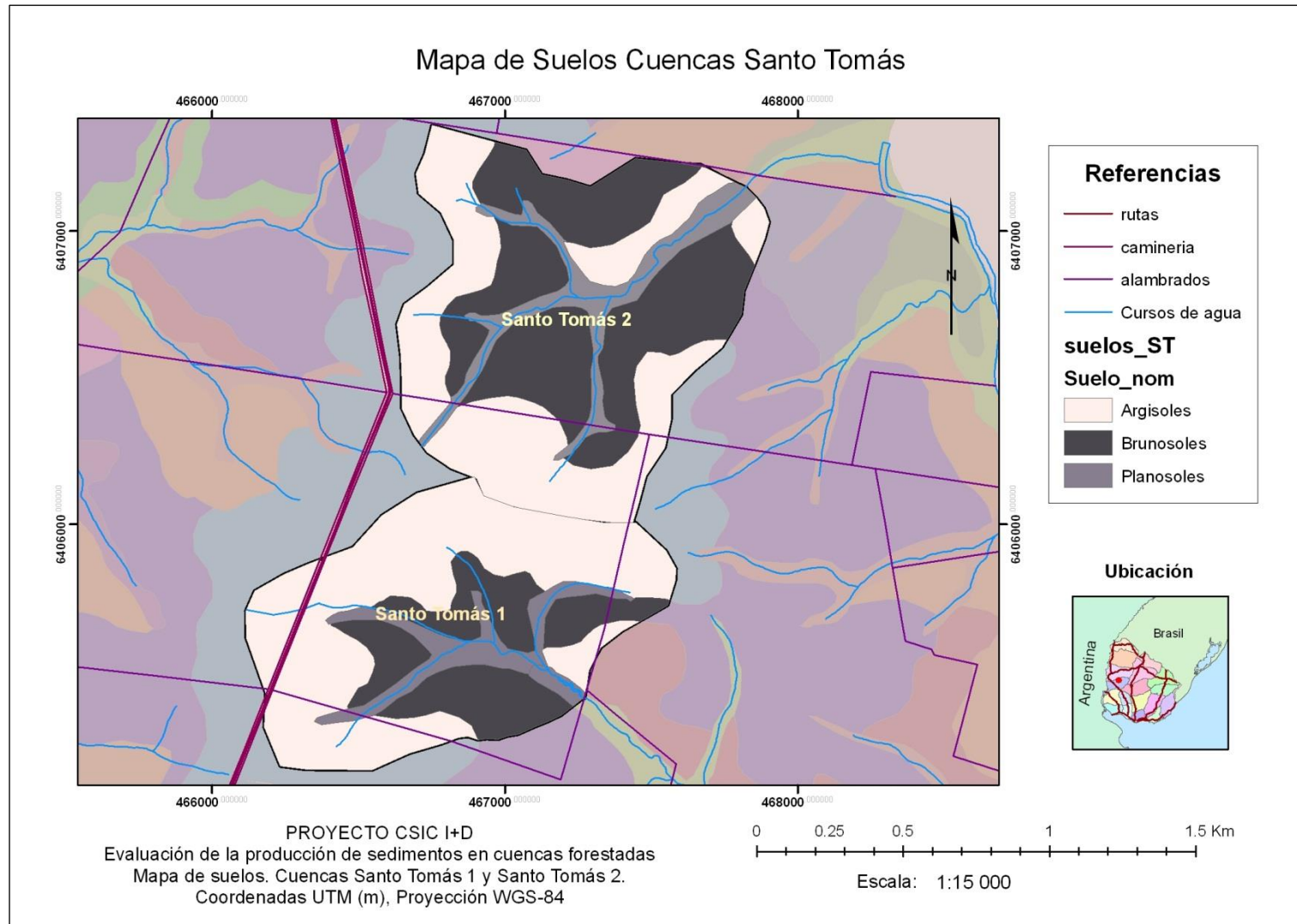


Figura 4- Mapa de suelos de las microcuencas (elaboración propia en base a información de suelos relevada en el Proyecto INIA FPTA 210, Silveira et al. 2011)

3.3 Información de base

El monitoreo en las cuencas del establecimiento Santo Tomás comenzó a fines del año 2007 en el marco del Proyecto INIA-FPTA “Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, en microcuencas similares sometidas a distinto manejo” y se continuó hasta julio de 2013 en el marco del presente estudio.

En la microcuenca Santo Tomás 1 se monitorea la precipitación incidente mediante un pluviógrafo marca Rainwise y el escurrimiento mediante un limnógrafo de boya, marca OTT modelo Thalimedes, que registra los niveles del tajamar que se encuentra en el punto de cierre (Figura 5).



Figura 5- Registro de niveles a la salida de las cuencas: a) Tajamar de ST1; b) Cauce de ST2

Como estaba previsto en la actividad 3, se elaboró la curva h-Q para el tajamar, en función del relevamiento topográfico del mismo y asumiendo que su vertedero se comporta como un canal infinito de pendiente suave a la salida del mismo.

En el caso de la cuenca ST2 el monitoreo se vió interrumpido por el reiterado robo de los equipos y destrucción de la instalación, por tanto no se cuenta con registros de niveles en una serie que permitiera realizar la estimación de caudales.

Por su parte en la cuenca ST1, no fue posible establecer valores confiables de escurrimientos a la salida de la cuenca ya que, en primer lugar, la estimación de la ecuación de Manning resultó en una gruesa sobreestimación de la erogación del tajamar y en segundo lugar existieron extracciones no cuantificadas durante ciertos períodos (ver Figura 6) que también afectan la estimación del volumen escurrido en la cuenca.

La serie de niveles registrada en la cuenca ST1, (Figura 6) permite observar que los escurrimientos en la cuenca aumentan considerablemente luego de la cosecha del monte, siendo que en el primer período el tajamar se encontró casi seco durante períodos prolongados existiendo vertidos en solo 3 oportunidades durante el período de registro. Mientras que en la segunda etapa, luego de la cosecha los niveles son generalmente altos y los vertidos frecuentes.

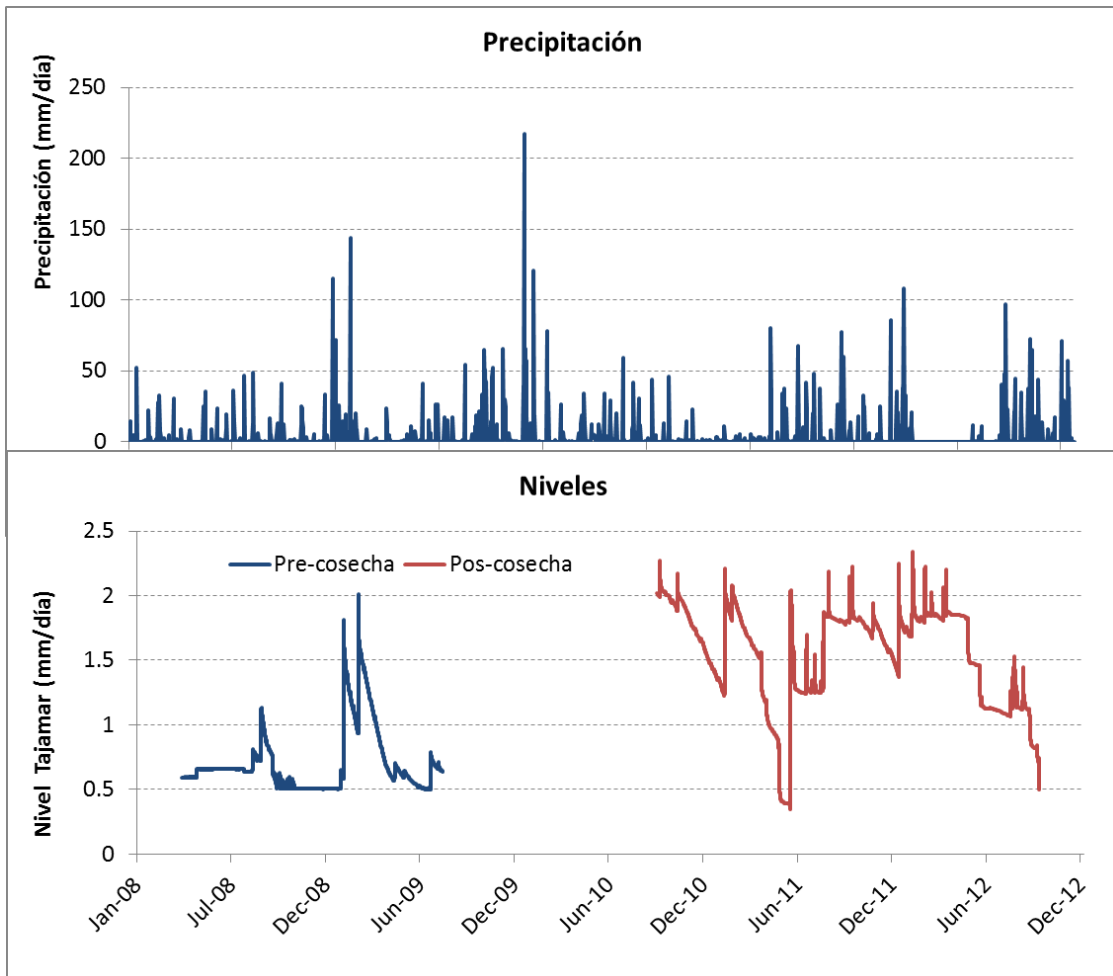


Figura 6- Series registradas de Precipitación y nivel diarios en la cuenca ST1

4. Metodología

4.1 Muestreo y procesamiento de muestras

En el año 2007, con el comienzo de los estudios del Proyecto INIA FPTA “Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, en microcuencas similares sometidas a distinto manejo”, se seleccionó un sitio para toma de muestras de referencia cercano a las microcuencas ST1 y ST2. El mencionado sitio se halla en uno de los cortafuegos de pasto natural sin modificación que circundan al monte plantado, debajo del trazado de una línea de alta tensión.

Posteriormente y una vez comenzadas las actividades del presente Proyecto, el diseño del muestreo contempló las instancias críticas que pretendía evaluarse y por ello se realizaron en cada microcuenca dos campañas: una previa a la cosecha del monte y otra posterior. La otra variable considerada fue la pendiente del terreno, con esta base se seleccionó en cada microcuenca una transecta en dirección a la mayor pendiente, la cual fue muestreada en tres zonas: alta, media y baja. Esto buscó representar las tres zonas donde se dan los procesos característicos que conforman la erosión de los suelos: desagregación, transporte y deposición.

De las metodologías recomendadas por Zapata (2002) inicialmente se optó por la que contempla la inserción en la masa de suelo de testigos de pared cilíndrica de 5cm de diámetro y 5cm de altura, extrayéndose el volumen de 10 testigos conforme se avanzaba 5 cm en profundidad en el perfil del suelo. La Figura 5a muestra un testigo aún inserto en la masa de suelo. La foto fue tomada durante el muestreo de suelos en ST1, cada muestra a ser estudiada está conformada por el material extraído con 10 de estos cilindros, hincados en el suelo a golpe seco. Una vez completada la primer etapa de muestreos se evaluó una mejora en la metodología que implicó el diseño y construcción de un muestreador, tipo barreno cilíndrico, de hierro y bronce con un diámetro de 7,2 cm (Figura 5b) que permite la toma de un volumen mayor de suelo por cada muestra minimizando así la compactación del suelo por acción del golpe al hincar el testigo o barreno.



Figura 7- – a) Testigos de PVC para toma de muestras; b) Muestreador tipo barreno cilíndrico

La preparación y el análisis de actividad de las muestras fue llevada a cabo en las instalaciones del Centro de Investigaciones Nucleares (CIN) de la Facultad de Ciencias. Una vez la muestra llega al laboratorio se realiza una serie de etapas pre-análíticas, con el fin de acondicionar la muestra para la posterior cuantificación de ^{137}Cs . Estas etapas son:

- Determinación de la masa y secado al aire libre.
- Secado en estufa a 60°C .
- Determinación de la masa seca.
- Molienda.
- Tamizado de la muestra seca con tamiz de 2mm.

4.2 Medición de Actividad de Cs

La actividad del ^{137}Cs en las muestras de suelo recabadas se midió en un detector gama de Germanio ultrapuro –HPGe- Canberra.

Dicha actividad del ^{137}Cs de una muestra, por unidad de masa, se calcula como el cociente de conteo de emisiones de fotones por unidad de tiempo por unidad de masa. (Zapata 2002). Debe, a su vez, dividirse el valor obtenido por el factor de eficiencia del medidor, dependiente de la masa de la muestra a ensayar; su expresión se obtiene por calibración del aparato midiendo el “conteo” de una muestra de material normalizado de actividad conocida.

Para ello el detector fue previamente calibrado por dos métodos:

- Con un estándar de suelo proporcionado por IAEA (MGS-5) en contenedor Marinelli de 500g.
- A través de simulación Montecarlo con el software Deteffversion 4.2 (N. Cornejo Díaz, M. Jurado Vargas)

La curva de calibración realizada fue comparable en ambos métodos, y la eficiencia para ^{137}Cs se realizó por interpolación en la relación eficiencia vs energía en KeV.

Las muestras de suelo fueron colocadas en un recipiente Marinelli, pesadas y medidas durante al menos 24 hs. El tiempo de análisis fue mayor en los casos de muestra con menor actividad, llegando a ser de hasta 4 días.

Posteriormente, se determinó las cuentas para el pico correspondiente a la energía 661.5 keV (^{137}Cs) y se procesaron los datos en planilla de cálculo. El procesamiento de los datos se realizó con el fin de determinar:

- 1- si el sitio referencia presentaba un perfil adecuado.
- 2- Determinar la actividad de referencia y la profundidad de relajación (A_{ref} y h_0) parámetros claves para la aplicación de los modelos de conversión a tasas de erosión.
- 3- La actividad de ^{137}Cs en las zonas de estudio a la fecha de interés.

4.3 Modelos de Conversión

El uso de las medidas de ^{137}Cs para estimar las tasas de pérdida y acumulación de suelo, se basa en el supuesto de que una relación fiable puede ser establecida entre el grado de aumento o decaimiento del inventario de cesio-137 en el suelo en relación al inventario de la línea de base y la profundidad total de suelo perdida o agregada. Walling y Quine (1990) recomiendan la aplicación de los procedimientos de contabilidad teóricas para establecer relaciones de calibración, ya que representan el efecto agregado de todos los procesos de redistribución.

En este contexto, el valor de referencia proporciona una evaluación de la entrada total de ^{137}Cs precipitado en el sitio, corregido por el decaimiento radiactivo al momento del muestreo. Las estimaciones resultantes de la tasa de erosión o sedimentación representan una tasa promedio para el período que se extiende desde el pico de ingreso de ^{137}Cs al suelo, principios y mediados de 1960, hasta el momento del muestreo. En el caso de Uruguay el establecimiento de la plantación forestal comercial se dio a mediados de la década de 1990 por lo cual esta cobertura vegetal no interfirió en la precipitación de la lluvia radioactiva de mediados de 1960, es por eso que pueden considerarse sitios de pastura natural como referencia para el establecimiento de tasas de erosión en tierras actualmente forestadas

Para la selección de los diversos procedimientos y modelos que se pueden utilizar para convertir las medidas de actividad a estimaciones de las tasas de erosión o deposición, es fundamental poder distinguir entre suelos cultivados y tierras de pastura o tierras de pastoreo, que son esencialmente inalterados. En la zona de estudio se considera para la aplicación de los modelos que el suelo es imperturbado, ya que originalmente el predio era un establecimiento ganadero, con cobertura de pasturas nativas. Posteriormente para el establecimiento de la plantación el suelo fue intervenido con excéntrica para marcación de surcos y luego subsolado a 40cm de profundidad en la fila de plantación. Las muestras de suelo para evaluación en el estudio fueron tomadas en la entrefila y puede considerarse por lo tanto suelo imperturbado. Esto deberá verificarse posteriormente cuando se analizan los perfiles de distribución del ^{137}Cs en profundidad para todos los sitios.

4.3.1 Modelo de perfil de distribución

En la mayoría de las condiciones, las concentraciones mayores de ^{137}Cs en suelos imperturbados se concentran cerca de la superficie y se reducen exponencialmente con la profundidad. La pérdida de un determinado porcentaje del inventario de referencia refleja una tasa de erosión mucho menor que para un suelo cultivado (Zapata, 2002). Ante la falta de relaciones empíricas basadas en mediciones de parcelas de erosión para este caso de estudio, se utiliza el enfoque teórico conocido como *Modelo del perfil de distribución*.

Este modelo plantea que si la distribución en profundidad de la concentración del radionucleido se puede caracterizar por una función numérica, es posible estimar la profundidad de suelo erosionado a partir de la proporción del inventario de referencia restante en el perfil del suelo. Generalmente la distribución en profundidad del ^{137}Cs de un suelo estable es exponencialmente decreciente con la profundidad, y puede describirse por la función siguiente (Walling y Quine, 1990; Zhang et al, 1990):

$$A(x) = A_{ref}(1 - e^{-x/h_0})$$

Donde

x: profundidad másica desde la superficie del suelo (kg/m^2)

A(x): Cantidad de ^{137}Cs sobre la profundidad x (Bq/m^2)

h_0 : coeficiente de forma del perfil (kg/m^2)

Si se asume que la deposición total de ^{137}Cs ocurrió en 1963 y que la distribución del radionucleido en profundidad del suelo es independiente del tiempo, puede estimarse la tasa de erosión, con la siguiente relación (Walling y Quine, 1990; Zhang et al, 1990):

$$Y = \frac{-10}{t - 1963} \ln \left[\left(1 - \frac{X}{100} \right) \right] h_0$$

Dónde: Y es la tasa de erosión [$\text{t}/\text{ha}\cdot\text{año}$]; t el año del muestreo [años]; X la reducción respecto al inventario de referencia [%].

4.3.2 Modelo de difusión y migración

La redistribución de ^{137}Cs dentro del perfil de suelo es el resultado de un conjunto de procesos biológicos, físicos y químicos que incluyen la adsorción y desorción del ^{137}Cs por las partículas del suelo.

He y Walling (1997) representan el efecto neto de todos esos procesos, utilizando un modelo de transporte unidimensional que se caracteriza por un coeficiente de difusión efectivo D [$\text{kg}/\text{m}^4\cdot\text{año}$] y una tasa de migración V [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{año}$] para el perfil del suelo. La variación temporal de la concentración de ^{137}Cs en la superficie del suelo puede expresarse como:

$$C_u(t) \approx \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t') e^{-R/H}}{\sqrt{D\pi(t-t')}} e^{-\frac{v^2(t-t')}{4D} - \lambda(t-t')} dt'$$

y siendo:

$$V \approx \frac{W_p}{(t - 1963)} \quad y \quad D \approx \frac{(N_p - W_p)^2}{2(t - 1963)}$$

Donde: C_u es la concentración en superficie [Bq/kg]; H es la profundidad de relajación [kg/m^2]; I(t) es el flujo de depósito de ^{137}Cs en t [$\text{Bq}/\text{m}^2\cdot\text{año}$]; λ es la constante de decaimiento del ^{137}Cs [$1/\text{año}$]; W_p la profundidad másica de la concentración máxima de ^{137}Cs [kg/m^2]; N_p la profundidad másica donde la concentración de ^{137}Cs se reduce a 1/e de la máxima [kg/m^2]

Para un sitio erosionado, donde el inventario de ^{137}Cs es menor al sitio de referencia, y puede asumirse erosión laminar, la tasa de erosión R se estima a partir de la reducción del inventario de ^{137}Cs A_s (Bq/m^2) y la concentración en superficie C_u , calculada anteriormente, mediante la siguiente relación:

$$\int_0^t P \cdot R \cdot C_u e^{-\lambda(t-t')} dt' = A_{ls}(t)$$

Para un sitio de sedimentación, la tasa de deposición R' se estima a partir de la concentración del sedimento depositado $C_d(t')$ y el inventario en exceso $A_{ex}(t)$, calculado como el inventario total del sitio menos el de referencia, usando la siguiente relación:

$$R' = \frac{A_{ex}}{\int_0^t C_d(t') e^{-\lambda(t-t')} dt'}$$

siendo

$$C_d(t') = \frac{1}{\int_S R dS} \int_S P' \cdot P \cdot C_u(t') R dS$$

4.4 Modelo de erosión USLE/RUSLE

Se determinó el riesgo de erosión en las microcuencas, en las situaciones de pre plantación forestal, monte implantado, y post-cosecha, condiciones que se describen como: campo natural (CN); monte implantado (MI) y monte recién cosechado con restos en superficie (MC).

Los factores del modelo se tomaron de la base de datos del programa de computación Erosión 5.0 (García Préchac et al., 2005), elaborado para facilitar el uso del modelo y disponible en la pág. Web de la Facultad de Agronomía de la UDELAR, Dpto. de Suelos y Aguas, Manejo y Conservación. El suelo considerado fue el dominante en la zona de estudio: unidad Algorta.

4.5 Modelación Hidrológica

Se seleccionó para realizar la modelación hidrológica de este estudio el modelo SHETRAN debido a su base física y puesto que su salida proporciona una descripción detallada en tiempo y espacio del flujo y del transporte en la cuenca. Esto lo convierte en una poderosa herramienta para el estudio de los efectos de los cambios de uso de suelo y de clima en los recursos hídricos, así como también para su aplicación en la gestión de los mismos. Como antecedentes locales SHETRAN fue previamente calibrado en dos microcuencas experimentales que integran la Red de microcuencas con la que se trabaja en esta línea de investigación (Alonso y Silveira, 2008)

SHETRAN es un modelo de base física espacialmente distribuido, en diferencias finitas, que integra la modelación superficial y subsuperficial incorporando los procesos hidrológicos de movimiento del agua, transporte de sedimentos y transporte de solutos en cuencas (Ewen et al, 2000). Fue desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Newcastle Upon Tyne, basado en el *Système Hydrologique Européen*. Sus ventajas radican en el significado físico de sus parámetros y en la modelación integrada del flujo superficial y subsuperficial. Su principal desventaja está relacionada a la incertidumbre de la parametrización debida fundamentalmente a: el uso de estimaciones; el efecto de escala y el concepto de "equifinality". Este último concepto refiere fundamentalmente a la idea de que existen muchos conjuntos de parámetros para una estructura de modelo elegida, que pueden reproducir adecuadamente el comportamiento observado del sistema que se modela (Beven et al. 2001).

La distribución espacial de las propiedades de la cuenca así como la información de entrada y la respuesta hidrológica se representan en la dirección horizontal mediante una grilla ortogonal y en la vertical mediante columnas con capas verticales en cada elemento de la grilla. Las principales estructuras de cálculo del SHETRAN son las columnas (Figura 5). Las redes de canales se modelan como conexiones y el resto de la cuenca como un conjunto de columnas. Cada columna contiene varias celdas de diferencias finitas, una sobre otra, y cada una debe estar asociada a un tipo de roca, suelo o cobertura vegetal.

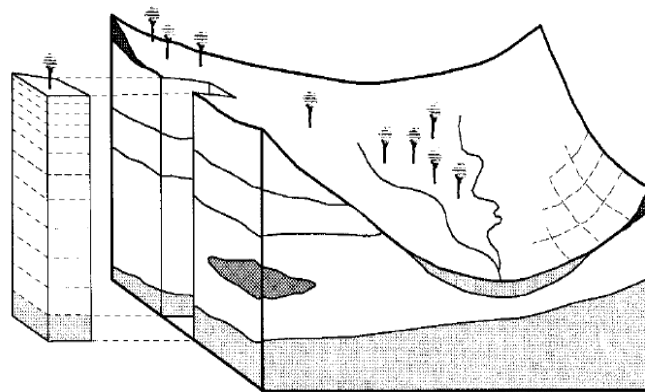


Figura 8- Esquema del SHETRAN en columnas y celdas (Ewen et al. 2000)

4.5.1 Módulo de transporte de agua

Los principales procesos dentro del componente hidrodinámico del SHETRAN están representados por las ecuaciones de la Tabla 2, la mayoría de las cuales son ecuaciones en derivadas parciales (Ewen et al., 2000):

Tabla 2- Principales procesos y ecuaciones en el componente hidrodinámico del SHETRAN

Proceso	Ecuación
Flujo subsuperficial	Ecuación de flujo variablemente saturado 3D (Parkin, 1996)
Flujo de superficie	Ecuaciones de Saint-Venant (aprox2D), (Abbot et al., 1986b)
Flujo en canales	Ecuaciones de Saint-Venant (aprox 1D), (Abbot et al., 1986b)
Intercepción del dosel	Ecuación de Rutter (Abbot et al., 1986b)
Evaporación	Ecuación de Penman-Monteith, o como fracción de la evapotranspiración potencial (Abbot et al., 1986b)

Para la aplicación del modelo SHETRAN es necesario contar con la siguiente información:

Información de entrada: Series de precipitación y evapotranspiración potencial

Parámetros: Propiedades que describen la cuenca, en condiciones normales esto puede incluir:

- Tamaño y posición de las columnas, conexiones de cauce y celdas de diferencias finitas
- Tipo de suelo/roca y profundidad para cada columna
- Uso de suelo/vegetación para cada columna
- Parámetros de drenaje del dosel y capacidad de almacenamiento
- Resistencia del dosel y resistencia aerodinámica
- Distribución en profundidad de la densidad radicular de la vegetación
- Porosidad y almacenamiento específico de los suelos/rocas
- Funciones de potencial matricial de suelos/rocas
- Funciones de conductividad no saturada de suelos/rocas
- Conductividad hidráulica saturada en suelos/rocas
- Condiciones iniciales

Variables: Información de respuesta de la cuenca modelada utilizada para la calibración del modelo o para la validación de la simulación. Normalmente puede incluir alguno de estos datos:

- Esguerrimiento observado
- Niveles de agua subterránea observados
- Intercepción del dosel medida
- Contenido de humedad de suelo medido, etc.

4.5.2 Módulo de transporte de sedimentos

Los procesos simulados por la componente de erosión del modelo SHETRAN como los describen Wicks y Bathurst (1996), comprenden:

- 1) Erosión de suelo por impacto directo de la gota de lluvia y del goteo desde las hojas del dosel forestal

- 2) Erosión de suelo por escurrimiento superficial
- 3) Convección bi-dimensional del sedimento erosionado, transportado como carga total y luego dividido en fracciones distintas de acuerdo al tamaño de las partículas de suelo

El primer componente determina la erosión usando la información de precipitación incidente y los resultados de la simulación del escurrimiento que realiza SHETRAN. En este módulo la erosión consiste en la desagregación de las partículas del suelo. Luego esas partículas serán transportadas con el flujo de agua simulado.

- 1) Erosión de suelo por impacto directo de la gota de lluvia y del goteo desde las hojas del dosel forestal

La tasa de erosión debida a este mecanismo se determina según:

$$D_r = k_r F_w (1 - C_g - C_r)(M_r + M_d)$$

Dónde: D_r tasa de desagregación del suelo [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]; k_r es el coeficiente de erodabilidad de la precipitación [J^{-1}]; C_g es la proporción de suelo cubierta por vegetación elevada [%]; C_r es la proporción de suelo cubierta por vegetación baja [%]; M_r momentum cuadrado de las gotas que alcanzan el suelo por unidad de tiempo y área [$\text{kg}^2\cdot\text{s}^{-3}$]; M_d momentum cuadrado del goteo desde el dosel que alcanzan el suelo por unidad de tiempo y área [$\text{kg}^2\cdot\text{s}^{-3}$].

El efecto protector de la lámina de escurrimiento superficial en reducir la energía con que alcanzan al suelo las gotas que precipitan, puede considerarse:

$$F_w \begin{cases} 1 & \text{si } h \leq d_m \\ e^{(1-\frac{h}{d_m})} & \text{si } h > d_m \end{cases}$$

Donde: h es la profundidad de la lamina (m) y d_m es el diámetro efectivo de la gota o el goteo (m), dado por:

$$d_m = \max \left[d_{\min}, d_l \left(\frac{DRAINA}{PNETTO} \right), 0.01935 PNETTO^{0.182} \right]$$

Dónde: d_{\min} se fija en 10-4m; d_l es el diámetro de goteo desde las hojas [m]; $DRAINA$ es el drenaje desde el dosel [m/s] y $PNETTO$ es la tasa de precipitación neta (directa más fustal) [m/s], estos dos últimos obtenidos del módulo de transporte de agua del SHETRAN.

- 2) Erosión de suelo por escurrimiento superficial

La tasa de erosión por flujo superficial, considerada como erosión laminar uniforme en las laderas de la cuenca, se determina mediante la siguiente aproximación:

$$D_q \begin{cases} k_f (1 - C_r) \left[\frac{\tau}{\tau_{ec}} - 1 \right] & \text{si } \tau > \tau_{ec} \\ 0 & \text{si } \tau \leq \tau_{ec} \end{cases}$$

Dónde: D_q es la tasa de desagregación del suelo por unidad de área [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$]; k_f coeficiente de erodabilidad del suelo al flujo superficial [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$]; τ tensión de corte [N/m^2]; τ_{ec} tensión de corte crítica [N/m^2].

En una primera instancia el suelo desagregado que es erosionado por el flujo superficial, mantiene la granulometría del suelo original.

5. Actividades, Avances y Dificultades del Proyecto

A continuación se detallan las actividades realizadas, con referencia al cronograma de actividades y los objetivos específicos logrados. En el segundo ítem se describen los principales avances producto de las actividades desarrolladas. Finalmente se describen las dificultades encontradas durante el desarrollo del Proyecto y que limitaciones impusieron éstas a los resultados alcanzados.

5.1 Actividades realizadas en el Proyecto

Actividad 1 - Mantenimiento del instrumental de monitoreo existente e instalación:

Esta actividad se ha cumplido de acuerdo a lo previsto en el cronograma original acompañando las visitas periódicas a las microcuencas de estudio. Además se ha instalado en la zona de estudio sensores de radiación y presión atmosférica que complementan el monitoreo de las variables atmosféricas, para el cálculo de la evapotranspiración, variable de entrada al modelo hidrológico. La instalación del perfilador de humedad adquirido fue realizada en otra de las microcuencas pertenecientes a la Red de microcuencas debido a su alto costo y la situación de robos ocurrida en la zona.

Actividad 2 - Monitoreo de las variables hidrometeorológicas

Esta actividad se ha realizado durante todo el período que se informa de acuerdo al cronograma en la microcuenca ST1. La microcuenca ST2 sufrió en dos oportunidades el robo de los equipos de monitoreo de niveles, lo que resultó en la decisión de no continuar con el monitoreo de precipitación y escorrentía en la misma.

Actividad 3 - Actualización de las curvas altura-caudal en los puntos de medición.

Con la información topográfica relevada en el tajamar de la microcuenca ST1 se procedió a la elaboración de una curva altura-volumen que permite conocer el volumen que ingresó al tajamar a partir del nivel medido sobre éste. Como complemento de esto se elaboró la relación altura-caudal a partir del nivel de vertido del tajamar. Con estas relaciones se estima el volumen que escurre en la microcuenca.

Actividad 4 - Muestreos de suelos

Esta actividad había comenzado en el marco del Proyecto INIA – FPTA 210 “Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, en microcuencas similares sometidas a distinto manejo”, financiado por el programa Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria que se ejecutó entre 2007 y 2010. Durante el mismo se realizó el muestreo de referencia para la microcuenca de ST1. Una segunda campaña de muestreo fue realizada durante el año 2010 ya en el marco de las actividades de este proyecto pero previamente a la aceptación de la propuesta presentada, debido a que el manejo de las plantaciones del área de estudio no depende del equipo de investigación, sino de la empresa dueña de las tierras. Finalmente dentro del plazo de ejecución del proyecto se completó el muestreo planificado.

A modo de observación se menciona que, tal como se planteó en el informe de avance del proyecto se había comenzado a muestrear otras dos microcuencas pertenecientes a la Red, ubicadas en el Establecimiento La Nueva Esperanza (LNE), que serían plantadas con eucaliptos a fines del año 2011. Se hicieron los muestreos correspondientes a la referencia y a la situación pre-plantación, pero por falta de tiempo dichas muestras no pudieron ser medidas. Por tanto esa línea de trabajo no fue continuada.

Fue así que los muestreos se ajustaron al siguiente cronograma:

Muestreo	Fecha Muestreo	Nro de muestras
Referencia ST1	Julio 2007	8
Pre-cosecha ST1	Febrero 2010	15
Pos-cosecha ST1	Junio 2010	12
Pre-cosecha ST2	Diciembre 2010	12
Pre-plantación LNE	Marzo 2011	10
Referencia LNE	Mayo 2011	8
Pos-cosecha ST2	Octubre 2012	18

Actividad 5 - Procesamiento de las muestras

Con la financiación de este proyecto fue posible mantener en funcionamiento el detector gama de Germanio ultrapuro –HPGe- Canberra del Centro de Investigaciones Nucleares de la Facultad de Ciencias. Fue así que pudieron procesarse todas las muestras extraídas según el siguiente cronograma.

Muestreo	Fecha análisis	Nro Muestras
Referencia ST1	Agosto 2010	8
Pre-cosecha ST1	Nov-Dic 2010	6
	Abr-Ago 2011	9
Pos-cosecha ST1	Julio 2011	9
	Agosto 2011	3
Pre-cosecha ST2	Nov-Dic 2011	12
Pos-cosecha ST2	May-Jun 2013	8
	Jul-Ago 2013	10

Como se observa los plazos de análisis se extendieron más allá de lo planificado originalmente, esto se debe principalmente al tiempo que insume la medición, en particular de las muestras de los estratos de suelo más profundos, donde la actividad radioactiva del ^{137}Cs es muy baja y por tanto es necesario hasta 4 días de medición continua para obtener el registro. Los resultados de esta actividad se presentan en el capítulo 6.2

Actividad 6 - Modelación hidrológica de microcuencas

La modelación hidrológica consistió en la implementación del módulo de transporte de agua del modelo hidrológico SHETRAN. Dicha implementación, se completó satisfactoriamente, a pesar de haber surgido dificultades que provocaron cambios en la metodología prevista originalmente. En particular se observa que los modelos implementados no pudieron ser calibrados ya que en la cuenca ST2 no se dispuso de monitoreo de niveles (ya mencionado en el ítem 2) y en la cuenca ST1, si bien los niveles se registraron en forma ininterrumpida, como se explicita en el ítem de la actividad 3, la relación h-Q no es confiable para todo el rango de registro.

Los modelos implementados se aceptan como válidos, ya que los parámetros físicos utilizados responden a la calibración hecha en una microcuenca de características semejantes en cuanto a pendientes y cobertura vegetal y distante unos 50 km de la zona de estudio. Los resultados se presentan en el capítulo 6.5.1.

Actividad 7 - Modelación de transporte de sedimentos

La primera etapa de esta actividad consistió en la revisión bibliográfica y la implementación de modelos de conversión actividad de Cs137 – tasa de erosión. Se consideró pertinente adelantar esta etapa respecto al cronograma original y se realizó durante los meses 9 al 12. Los resultados se presentan en el capítulo 6.3.

Luego de finalizada la actividad 6, se procedió a cumplir la segunda parte de la actividad 7 que consistió en la implementación del módulo de transporte de sedimentos del modelo hidrológico SHETRAN. Los resultados se presentan en el capítulo 6.5.2.

Actividad 8 - Difusión

Las actividades de difusión del proyecto, fueron las siguientes:

1. Agosto 2011: Seminario en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. “El Cs¹³⁷ como indicador de erosión hídrica de suelos en el Uruguay”.
2. Octubre 2011: XIX Jornadas de Jóvenes Investigadores Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM). Presentación de Martín Scavone en formato póster.
3. Setiembre 2012: Presentación oral del trabajo “Comparison of measured 137Cs data and USLE/RUSLE simulated long-term erosion rates” en la 19th ISTRO Conference – IV SUCS Meeting realizado entre el 24 y el 28 de setiembre de 2012 en Uruguay.
4. Marzo 2013: Presentación de resultados en el "Primer Taller de Intercambio del Proyecto Alianzas EROSIÓN: INDICADORES Y EFECTOS DEL MANEJO FORESTAL", realizado el 13 de marzo de 2013 en el Hotel Intercity de Montevideo.
5. Noviembre 2013: Presentación de resultados en el Seminario "Indicadores de erosión hídrica en suelos de uso forestal", realizado el 27 de noviembre de 2013 en la Estación Experimental INIA Tacuarembó, Tacuarembó.

Las publicaciones surgidas durante el Proyecto, fueron:

Alonso, J.; Audicio, P.; Martínez, L.; Scavone, M; Rezzano, E. 2012. *Comparison of measured Cs-137 data and USLE/RUSLE simulated long-term erosion rates*. Agrociencia (Uruguay), Special issue. vol.: 16 2 1, p.: 261 -267.

Scavone, M; Martínez, L.; Audicio, P.; Alonso, J. *El Cs137 como indicador de la erosión hídrica en suelos en el Uruguay*. Anales de las XIX Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM, Ciudad del Este, Paraguay, 2011

Actividad 9 - Informes y presentaciones

La actividad prevista para el mes 12 fue cumplida en tiempo con la presentación del Informe de Avance. La actividad prevista para el mes 24, se cumple con la presentación de este informe.

5.2 Avances obtenidos.

Se destaca como principal avance del Proyecto el apoyo a la creación de una nueva línea de investigación que pretende estudiar los efectos del cambio de uso en el suelo sobre la producción de sedimentos en cuencas y las tasas de erosión de los suelos, basándose en la técnica FRN (Fallout radio nuclides), en particular ^{137}Cs . Si bien los trabajos en colaboración habían comenzado previamente a la ejecución del Proyecto, es con éste que se consolida el grupo de trabajo compuesto por investigadores del IMFIA de la Facultad de Ingeniería, el CIN de la Facultad de Ciencias y del Departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía.

Otros avances refieren a las mejoras metodológicas de la técnica del ^{137}Cs . En primer lugar se logró un ajuste de la metodología de campo para la extracción de las muestras. La metodología original con cilindros de PVC hincados en el suelo fue sustituida por un muestreador de hierro y bronce diseñado y realizado en el marco del proyecto. En segundo lugar se ajustó la metodología de laboratorio para el procesamiento de las muestras, desde la molienda de las mismas para lo cual se adquirió un molino especial para suelos, hasta la calibración y el ajuste de los tiempos de análisis en el detector HPGe Canberra del CIN (Facultad de Ciencias).

Se identificaron limitaciones y potencialidades para la metodología del ^{137}Cs . Respecto al objetivo planteado en este proyecto, en esta experiencia se obtuvieron resultados netamente satisfactorios ya que las evaluaciones efectuadas han devuelto resultados esperables, en concordancia con la bibliografía de referencia y que pueden ser deducidos como el resultado de una secuencia de eventos de desplazamiento de suelos ocurridos en la zona de estudio.

A pesar que la inversión en instalaciones y personal técnico calificado puede resultar onerosa para las finanzas de un laboratorio y que el procedimiento de conteo de actividad solicita una carga horaria importante –debido a los bajos niveles de actividad radioactiva presentes en los suelos de nuestro país, el conteo de actividad de ^{137}Cs de una única muestra puede llevar hasta 4 días en forma continua-, la técnica ha probado en esta primer experiencia ser una herramienta fuerte y confiable a la hora de conducir estudios de redistribución de sedimentos.

Finalmente a partir de esta primer aplicación de la metodología del Cs se cuenta con una alternativa posible para la calibración en las condiciones locales tanto de los parámetros físicos relacionados a la erodabilidad de los suelos y de la precipitación, intrínsecos al modelo hidrológico utilizado en este estudio SHETRAN, como de los parámetros del modelo USLE/RUSLE, relativos al uso y manejo del suelo.

5.3 Dificultades enfrentadas en el desarrollo del proyecto.

La principal dificultad con la que se enfrentó el equipo fue compatibilizar con los objetivos planteados, el manejo forestal del que fueron objeto las microcuencas propuestas originalmente como objeto de estudio (ST1 y ST2). En los dos casos el momento de cosecha se definió en función de la planificación establecida por la empresa dueña de los predios. Resultando que en ambos casos hubo lluvias antecedentes importantes que generaron altos contenidos de agua en de los suelos de ambas microcuencas. Por esto no fue posible contrastar la producción de sedimentos debida a la cosecha bajo distintas condiciones de humedad antecedente.

Otra dificultad encontrada fue el robo repetido del equipamiento de monitoreo de caudales en la microcuenca ST2. Debido a esto se discontinuó el monitoreo de variables hidrológicas en dicha microcuenca lo cual anula la posibilidad de validar la implementación de un modelo hidrológico como el SHETRAN. Ante esto se tomó la decisión de completar los muestreos de suelos en ST2, con el objetivo de ampliar la base de datos de actividad de Cs¹³⁷ en suelo, pero sin implementar modelos de transporte de agua y/o sedimentos en dicha microcuenca.

Finalmente se observa la dificultad que planteo el alto costo en tiempo que insumió el conteo de actividad de 137Cs en las muestras ya reseñado. Esto se traduce en una debilidad del proyecto ya que el limitado número de sitios muestreados y la falta de repeticiones en cada sitio, redundan en un menor nivel de certeza en los resultados que deben ser tomados como tendencia en cuanto a su comportamiento y no como valores de referencia.

6. Resultados

6.1 Medición de Actividad de Cs

En primer lugar se procesaron las muestras correspondientes al sitio referencia, los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3- Actividad de ^{137}Cs en el perfil del sitio de referencia

Fecha análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. másica acum kg/ m ²	DSA acum. Bq/ m ²
8/24/2010	0-5	0.864	1.01	1.16	51.02	0.0	329.46
8/20/2010	5-10	1.019	1.59	1.55	129.84	44.0	278.44
8/18/2010	10-15	1.182	1.08	0.79	73.47	128.0	148.59
8/19/2010	15-20	1.159	0.61	0.52	41.18	220.6	75.12
8/26/2010	20-25	1.009	0.22	0.22	19.34	300.3	33.94
8/27/2010	25-30	0.997	0.18	0.17	14.60	388.8	14.60
8/30/2010	30-35	0.898	0.03	0.04	3.17	472.5	3.17
8/17/2010	35-40	0.866	0.03	0.03	2.30	555.5	2.30

En la Figura 9 se muestra como los puntos medidos muestran un comportamiento exponencial decreciente muy ajustado. En función de los resultados del perfil, se ajusta la función en base a la cual se determinan los parámetros $A_{ref}=437.2 \text{ kg/m}^2$ y $h_0=117,6 \text{ Bq/kg}$.

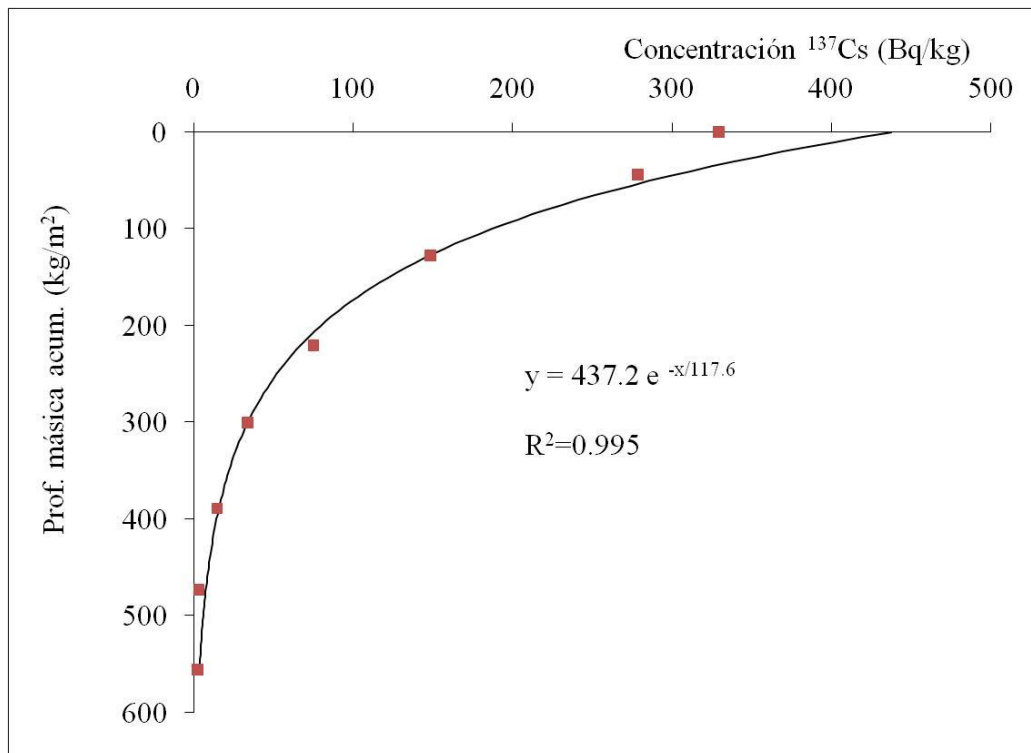


Figura 9- Perfil del inventario de ^{137}Cs en profundidad para el sitio de referencia

De la Tabla 4 a la Tabla 15 se muestran los resultados de los perfiles de los sitios analizados:

Tabla 4 - Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST1 pre-cosecha, Ladera Alta

Fecha análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. másica acum kg/m ²	DSA acum. Bq/m ²
12/17/10	0-5	1.52	1.70	1.14	88.62	0	490.09
5/4/11	5-10	1.1	1.57	1.47	127.02	77.80	401.47
8/11/11	10-15	1.18	1.79	1.57	132.00	164.38	274.45
4/29/11	15-20	1.02	0.94	0.94	84.22	248.41	142.45
5/17/11	20-25	0.96	0.47	0.50	46.39	337.54	58.23
	25-30					429.72	11.84
	30-35					480.50	2.91
	35-40					526.23	1.33

Tabla 5 - Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST1 pre-cosecha, Ladera Media

Fecha análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. másica acum kg/m ²	DSA acum. Bq/m ²
11/19/10	0-5	1.43	1.68	1.20	88	0	244
11/22/10	5-10	1.66	1.75	1.13	96	73	156
11/24/10	10-15	1.90	0.72	0.40	39	157	60
11/26/10	15-20	1.81	0.12	0.07	7	254	21
12/10/10	20-25	1.95	0.05	0.03	3	346	15
		1.00		0.18	9	446	12
		0.90		0.03	2	496	3
		0.87		0.03	1	542	1

Tabla 6- Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST1 pre-cosecha, Ladera Baja

Fecha análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. másica acum kg/m ²	DSA acum. Bq/m ²
5/16/11	0-5	1.38	2.01	3.00	210	0	488
5/19/11	5-10	1.65	1.16	1.66	140	70	278
5/26/11	10-15	1.74	0.71	0.91	81	154	138
5/30/11	15-20	1.77	0.32	0.33	29	243	57
6/1/11	20-25	1.87	0.13	0.17	16	333	28
		1.00		0.18	9	428	12
		0.90		0.03	2	479	3
		0.87		0.03	1	524	1

Tabla 7- Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST1 pos-cosecha, Ladera Alta

Fecha análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. música acum kg/ m ²	DSA acum. Bq/ m ²
7/6/2011	0-5	1.35	1.10	1.24	85	0	426
7/14/2011	5-10	1.53	1.39	1.43	111	69	340
7/19/2011	10-15	1.55	1.28	1.64	130	147	229
7/20/2011	15-20	1.64	0.63	1.01	84	226	99
	20-25	1.00		0.18	9	309	15
	25-30	0.90		0.03	2	360	3
	30-35	0.87		0.03	1	406	2
	35-40						

Tabla 8- Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST1 pos-cosecha, Ladera Media

Fecha análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. música acum kg/ m ²	DSA acum. Bq/ m ²
8/4/2011	0-5	1.51	0.90	1.27	98	0	432
8/3/2011	5-10	1.66	1.58	1.96	166	77	334
8/1/2011	10-15	1.70	0.91	1.20	104	162	168
7/29/2011	15-20	1.70	0.48	0.58	50	248	65
	20-25	1.00		0.18	9	335	15
	25-30	0.90		0.03	2	385	3
	30-35	0.87		0.03	1	431	2
	35-40						

Tabla 9- Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST1 pos-cosecha, Ladera Baja

Fecha análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. música acum kg/ m ²	DSA acum. Bq/ m ²
7/28/2011	0-5	1.14	1.65	2.51	146	0	449
7/27/2011	5-10	1.54	1.80	2.00	157	58	304
7/25/2011	10-15	1.53	0.84	1.17	91	136	147
7/22/2011	15-20	1.49	0.47	0.54	41	214	56
	20-25	1.00		0.18	9	290	15
	25-30	0.90		0.03	2	341	3
	30-35	0.87		0.03	1	387	2
	35-40						

Tabla 10- Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST2 pre-cosecha, Ladera Alta

Fecha Análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. másica acum kg/ m ²	DSA acum. Bq/ m ²
07/12/11	0-5	1.46	1.15	1.67	124	463	0
08/12/11	5-10	1.78	1.51	1.77	160	339	74
12/12/11	10-15	1.62	1.28	1.32	108	179	165
09/12/11	15-20	1.66	0.67	0.67	56	71	247
	20-25	1.00		0.18	9	15	331
	25-30	0.90		0.03	2	3	382
	30-35	0.87		0.03	1	2	428
	35-40						

Tabla 11- Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST2 pre-cosecha, Ladera Media

Fecha Análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. másica acum kg/ m ²	DSA acum. Bq/ m ²
13/12/11	0-5	1.51	1.93	1.94	149	461	0
14/12/11	5-10	1.78	1.83	1.93	175	312	77
15/12/11	10-15	1.73	0.95	0.92	81	137	168
16/12/11	15-20	1.55	0.57	0.52	41	56	256
	20-25	1.00		0.18	9	15	335
	25-30	0.90		0.03	2	3	386
	30-35	0.87		0.03	1	2	431
	35-40						

Tabla 12- Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST2 pre-cosecha, Ladera Baja

Fecha Análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. másica acum kg/ m ²	DSA acum. Bq/ m ²
19/12/11	0-5	1.06	2.56	2.67	144	488	0
20/12/11	5-10	1.52	2.76	2.67	207	344	54
21/12/11	10-15	1.70	1.31	1.08	93	137	131
22/12/11	15-20	1.62	0.42	0.36	29	44	218
	20-25	1.00		0.18	9	15	300
	25-30	0.90		0.03	2	3	351
	30-35	0.87		0.03	1	2	397
	35-40						

Tabla 13- Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST2 pos-cosecha, Ladera Alta

Fecha Análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. másica acum kg/ m ²	DSA acum. Bq/ m ²
5/14/2013	0-5	1.00	1.15	1.15	79	309	0
5/28/2013	5-10	1.16	1.35	1.17	92	230	69
5/13/2013	10-15	1.08	0.98	0.90	70	138	147
5/10/2013	15-20	1.11	0.46	0.41	32	68	225
6/7/2013	20-25	1.06	0.33	0.32	23	37	302
7/15/2013	25-30	1.13	0.10	0.09	7	14	374
	30-35					7	451
	35-40					3	553

Tabla 14- Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST2 pos-cosecha, Ladera Media

Fecha Análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. másica acum kg/ m ²	DSA acum. Bq/ m ²
7/9/2013	0-5	1.05	1.29	1.23	89	72	258
7/4/2013	5-10	1.02	0.94	0.93	65	142	169
7/10/2013	10-15	1.07	0.89	0.83	56	209	104
7/30/2013	15-20	1.11	0.32	0.29	22	284	49
7/19/2013	20-25	1.08	0.16	0.15	11	360	27
8/2/2013	25-30	1.09	0.13	0.12	9	434	15
	30-35					507	7
	35-40					609	3

Tabla 15- Actividad de ¹³⁷Cs en el perfil del sitio ST2 pos-cosecha, Ladera Baja

Fecha Análisis	Profundidad cm	masa muestra kg	Act. en fecha de muestreo Bq	DMA Bq/kg	DSA Bq/m ²	Prof. másica acum kg/ m ²	DSA acum. Bq/ m ²
6/12/2013	0-5	0.94	1.49	1.59	118	74	547
7/1/2013	5-10	0.87	1.75	2.01	149	149	428
6/13/2013	10-15	0.79	1.52	1.91	145	225	279
6/26/2013	15-20	0.94	1.00	1.06	81	301	134
7/11/2013	20-25	1.11	0.43	0.39	29	377	53
7/5/2013	25-30	1.00	0.21	0.21	17	456	23
	30-35				4	535	7
	35-40				3	637	3

En las Figuras 10a a 10g y Figura 11a a 11g se presentan los perfiles de concentración de ¹³⁷Cs en profundidad, donde puede apreciarse la redistribución del radionucleido en el suelo debida a la erosión y sedimentación de los sitios.

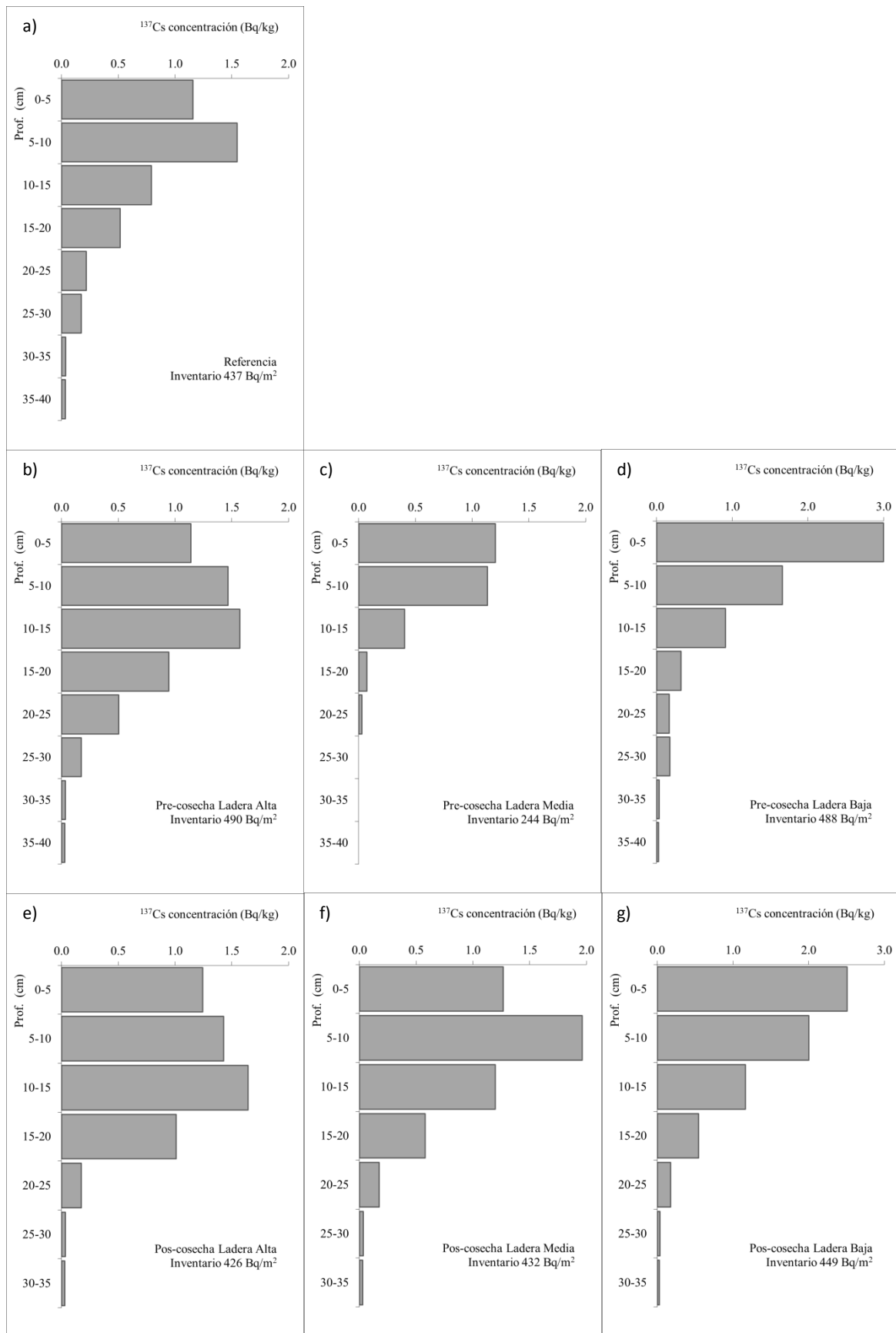


Figura 10 – Concentración de ^{137}Cs en el perfil de suelo de los sitios muestreados en ST1: a) Referencia; b), c) y d) Precosecha Alto, Medio y Bajo; e), f) y g) Poscosecha Alta, Medio y Bajo

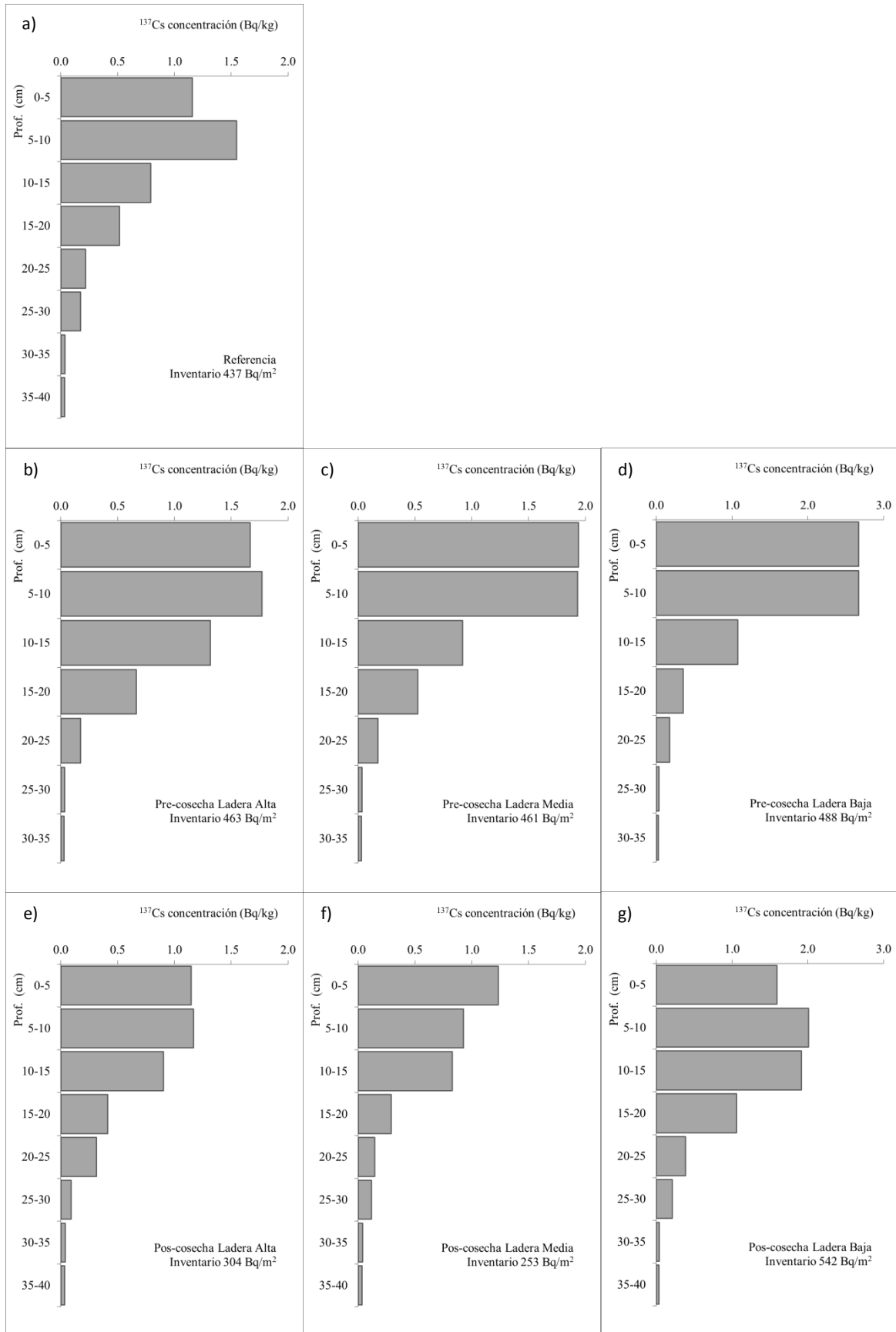


Figura 11 – Concentración de ¹³⁷Cs en el perfil de suelo de los sitios muestreados en ST2: a) Referencia; b), c) y d) Precosecha Alto, Medio y Bajo; e), f) y g) Poscosecha Alto, Medio y Bajo

Finalmente se presenta en la Tabla 16 un resumen de los resultados del inventario total de ^{137}Cs en cada sitio de muestreo, con un signo (+) indicando si el valor indica ganancia de suelo o un signo (-) si indica pérdida.

Tabla 16- Resumen de inventario total de ^{137}Cs por sitio muestreado

DSA(Bq/m ²)	ST1 pre-cosecha	ST1 pos-cosecha	ST2 pre-cosecha	ST2 pos-cosecha
Ladera alta	490.1 (+)	425.7 (-)	463.2 (+)	304.4 (-)
Ladera media	244.1 (-)	431.8 (-)	461.3 (+)	253.4 (-)
Ladera baja	487.7 (+)	449.3 (+)	487.7 (+)	542.3 (+)

Analizando los valores de la Tabla 16, se observa que las tendencias encontradas no responden a lo esperado previamente a la determinación de los inventarios de ^{137}Cs en las muestras. Del análisis detallado se concluyó que:

- 1) Las muestras de ST1 precosecha y poscosecha deben ser consideradas como repeticiones de un mismo muestreo y no como dos muestras independientes. Esto se debe al breve lapso de tiempo que separó ambas muestras, lo que hace que la técnica del ^{137}Cs no pueda reflejar diferencias entre ambas. Se considerará que la tasa de erosión reportadas por el promedio de los inventarios de estos muestreos representan las condiciones del monte implantado.
- 2) El muestreo de ST2 pre-cosecha no refleja erosión sino sedimentación en todos los puntos lo que hace que deba ser descartado con miras a la aplicación de los modelos de conversión.
- 3) El muestreo de ST2 pos-cosecha reporta pérdida mayores del radionucleido, lo que hace esperar que puedan encontrarse en este muestreo tasas de erosión mayores debidas al efecto de los dos años posteriores a la cosecha.

Es así que se aplicarán los modelos de conversión sobre dos sets de datos, uno que represente la situación pre-cosecha en ST1 y otro que represente la situación pos-cosecha en ST2, como muestra la Tabla 17.

Tabla 17- Inventarios considerados para la aplicación de los modelos de conversión

DSA(Bq/m ²)	ST1 pre-cosecha	ST2 pos-cosecha
Ladera alta	457.9	304.4
Ladera media	338.0	253.4
Ladera baja	468.5	542.3

6.2 Modelos de Conversión

En primer lugar fueron determinados los parámetros fundamentales de los modelos reseñados en el capítulo 4.3. Además del parámetro h_0 cuyo resultado se presentó en el capítulo 6.2, se determinaron los coeficientes de difusión efectivo D [$\text{kg}/\text{m}^4\cdot\text{año}$] y la tasa de migración V [$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{año}$] para el perfil del suelo del sitio de referencia, asumiendo que dicho perfil se mantiene en cuanto a su comportamiento, dichos parámetros serán válidos para el resto de los sitios analizados.

En la Figura 12 se muestra el comportamiento del perfil de concentración de ^{137}Cs en profundidad y se identifican los parámetros W_p y N_p , profundidad másica de la máxima concentración y profundidad a la que la concentración se reduce a $1/e$ de la máxima, respectivamente.

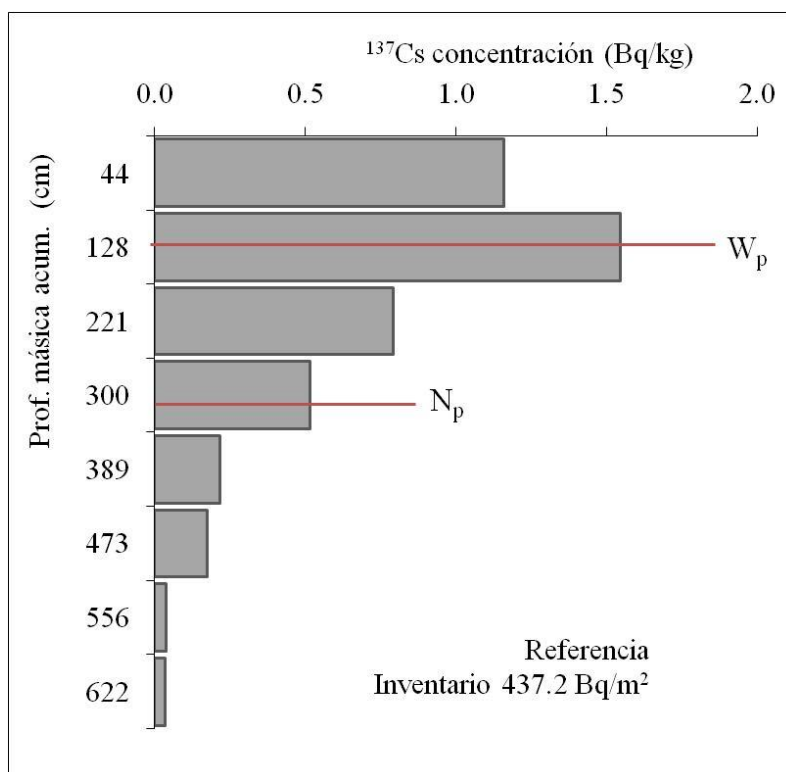


Figura 12- Perfil de concentración de ^{137}Cs en profundidad

Con dichos valores se calculan los parámetros $D=267 \text{ kg}/\text{m}^4\cdot\text{año}$ y $V= 2,7 \text{ kg}/\text{m}^2\cdot\text{año}$.

6.3.1 Modelo de perfil de distribución

Los resultados del Modelo del perfil de distribución, se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18- Tasas de pérdida de suelo, según modelo de perfil de distribución

Y (ton/ha.año)	ST1 pre-cosecha	ST2 pos-cosecha
Ladera alta		-9.0
Ladera media	-6.44	-13.7
Ladera baja	1.79	6.0
Erosión bruta	-3.2	-7.6
Erosión neta	-2.3	-5.6
Tasa de entrega de sedimentos	72%	73%

6.3.2 Modelo de difusión y migración

Los resultados del Modelo de difusión y migración, se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19- Tasas de pérdida de suelo, según modelo de difusión y migración

Y (ton/ha.año)	ST1 pre-cosecha	ST2 pos-cosecha
Ladera alta		-7.2
Ladera media	-5.3	-10.1
Ladera baja	1.7	5.71
Erosión bruta	-2.6	-5.8
Erosión neta	-1.8	-3.9
Tasa de entrega de sedimentos	69%	67%

Dado la representación más aproximada de los procesos de difusión y migración del ^{137}Cs en el suelo, los valores reportados por este segundo modelo pueden considerarse más cercanos a la realidad.

Como se observa ambos modelos reportan para la etapa pos-cosecha tasas de erosión del orden del doble de las tasas del período pre-cosecha, 1.8 y 3.9 t/ha. año respectivamente. Sin embargo debe considerarse que la tasa de erosión estimada mediante esta metodología es representativa de lo ocurrido desde el año 1963 en adelante. Por esto en el valor estimado para las condiciones de ST1 Pre-cosecha se integra en forma ponderada la tasa media de erosión en las pasturas nativas durante los primeros 35 años, y la tasa media de los siguientes 12 años correspondientes al establecimiento y desarrollo de la plantación forestal. De la misma forma el valor estimado para ST2 pos-cosecha integra en la ponderación los dos últimos años correspondientes a la cosecha de la plantación forestal y su posterior re-plantación.

6.3 Modelo de erosión USLE/RUSLE

En la Tabla 20 se presentan las estimaciones de erosión para las microcuencas testigo La Cantera y Don Tomás para las mismas condiciones evaluadas en las microcuencas sometidas a diferentes momentos de cosecha.

Fueron consideradas 3 posiciones topográficas distintas con pendientes representativas, 0% de pendiente (S) para la zona alta y plana, 3% para la zona de ladera media y 0.5% en ladera baja, y se tomo una longitud de la pendiente (L) de 100 m en cada caso con el objetivo de hacer comparable los resultados. En ninguna de las situaciones se supera el monto de pérdida de suelo tolerable para el suelo considerado (unidad Algorta), el cual es de 7 Mg/ha.año.

Tabla 20- Estimación de la pérdida de suelo para diferentes situaciones en las microcuencas sometidas a prácticas de cosecha, establecimiento Santo Tomas, modelo EROSION 5. (Silveira et al., 2011)

Tipo de suelo	Topografía	Situación ¹	Parámetros del modelo Erosión 5.0						Erosión estimada Mg/ha
			R	K	S	L	C Rusle	P	
Argisol Unidad Algorta	Ladera alta	CN	659	0.20	0	100	0.02	1	0.1
		MI					0.006		0
		MC					0.03		0.1
	Ladera media	CN	659	0.20	3	100	0.002	1	1.5
		MI					0.006		0.4
		MC					0.03		2.2
	Ladera baja	CN	659	0.20	0.5	100	0.002	1	0.3
		MI					0.006		0.1
		MC					0.03		0.4

1 CN: campo natural, MI: monte implantado, MC: monte recién cosechado con restos en superficie

6.4 Modelación Hidrológica

La malla utilizada para la implementación del modelo de Santo Tomás 1 en SHETRAN contiene 386 elementos de 50 x 50 m y 57 nodos de red de drenaje (Figura 13). El modelo de elevación también puede verse en la misma figura. La implementación del modelo fue llevada a cabo en el período 01/01/2008 al 31/12/2012. En primer lugar se considera la cobertura forestal original de la cuenca para el período 01/01/2008 al 31/12/10 y en segundo lugar se realizó la simulación para las condiciones de cosecha en el período 01/01/2011 al 31/12/2012, utilizando exactamente los mismos parámetros para los suelos pero cambiando los parámetros correspondientes a la vegetación.

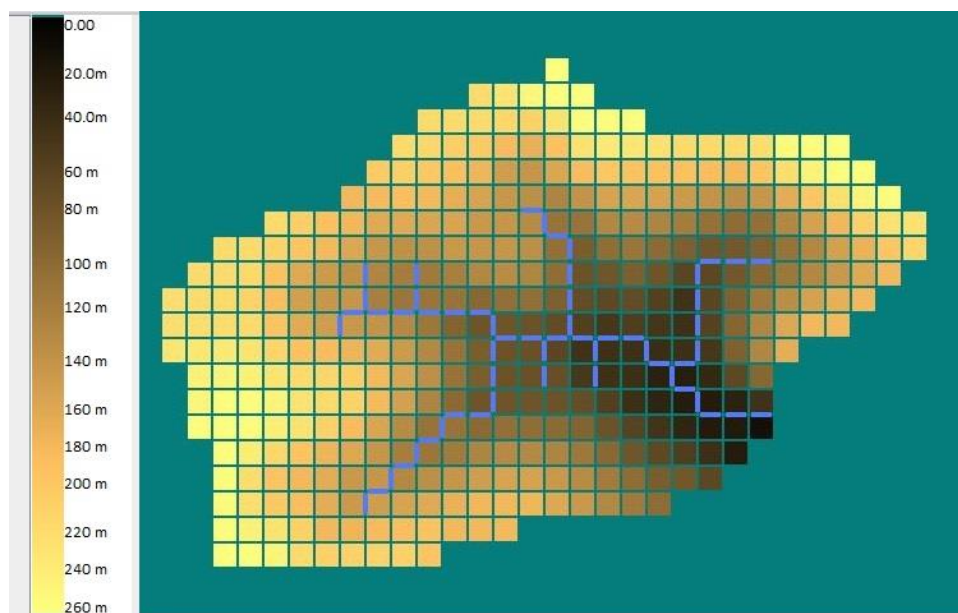


Figura 13- Malla de cálculo y modelo de elevaciones de la cuenca Santo Tomás 1.

Se especificaron las características y parámetros de la Tabla 21, para los suelos de la cuenca:

Tabla 21- Descripción y parámetros de los suelos para el modelo SHETRAN.

Suelo	Capa	Profundidad (m)	Conductividad de saturación (m/día)
Plansoles	Horizonte A	0.75	0.422
	Horizonte B	1.30	0.029
Brunosoles	Horizonte A	0.38	0.103
	Horizonte B	1.03	0.103
Argisoles	Horizonte A	0.40	0.422
	Horizonte B	0.80	0.103

El coeficiente de Strickler, que representa la resistencia al flujo superficial fue calibrado en 0,4 para las condiciones de monte implantado y se mantuvo igual para la plantación cosechada con restos en superficie.

Los parámetros de la vegetación correspondientes a los dos períodos, se muestran en la Tabla 22. Los coeficientes correspondientes al monte forestal de eucaliptos adulto fueron obtenidos de una calibración previa en una microcuenca de características similares (Alonso, 2011) perteneciente a la Red de microcuencas ya mencionada, aunque fue necesario cierto nivel de calibración para un mejor ajuste. Los coeficientes correspondientes a la cobertura de monte cosechado con restos en superficie fueron originalmente tomados de recomendaciones (Birkinshaw, comunicación personal) y con cierto nivel de ajuste posterior.

Tabla 22- Parámetros de la vegetación para el modelo SHETRAN.

Cobertura	Drenaje del dosel		Almacena miento del dosel (mm)	Prof. radicular (m)	Resistencia aerodinámica (s/m)	Índice de área foliar (IAF)	Resistencia del dosel (s/m)
	CK (mm s ⁻¹)	Cb (mm ⁻¹)					
Monte adulto de eucaliptus	1.4E-5	3.5	1.0	2.0	3.5	3.0	100
Monte cosechado con restos en superficie	1.4E-5	3.5	0.5	0.2	40.0	1.0	65

La evapotranspiración fue simulada usando la ecuación de Penman-Monteith, a partir de información meteorológica horaria.

La curva granulométrica de los suelos de la cuenca no es conocida más allá del tamaño correspondiente a las arenas, por lo tanto se seleccionó la siguiente distribución estándar para representar los tres suelos de la cuenca por igual: 0.1mm (60%), 0.37mm (20%), 0.89mm (10%), 1.59mm (5%), 2.25mm (3%) y 3.25mm (2%).

Los parámetros de mayor importancia en la representación de la erosión de suelos son los coeficientes de erodabilidad de la precipitación (k_p) y el coeficiente de erodabilidad del suelo al flujo superficial (k_f), inicialmente el modelo fue implementado con valores tomados de recomendaciones (Birkinshaw, comunicación personal) y ajustados posteriormente en función de los resultados obtenidos con las estimaciones realizadas mediante la técnica del ¹³⁷Cs.

Tabla 23- Parámetros del módulo de transporte de sedimentos del modelo SHETRAN

Cobertura	erodabilidad de la precipitación (J ⁻¹)	erodabilidad del suelo al flujo superficial (kg/m ² .s)
Monte adulto de eucaliptus	0.5	5E-5
Monte cosechado con restos en	0.05	2E-7

6.4.1 Módulo de transporte de agua

Se destaca que debido a las variaciones en el nivel del vertedero del tajamar, no se realizó una calibración sino que se representó el comportamiento de la serie de niveles. Para el período pre-cosecha desde el 01/01/2008 al 31/10/2010 el patrón de verificación de la bondad del ajuste fueron los coeficientes de escurrentía anuales en la cuenca en comparación con otra cuenca de similares características y también con cobertura de monte adulto de eucaliptos, perteneciente a la Red, para el mismo período.

De la misma forma se simularon los caudales simulados para el período pos-cosecha de la plantación forestal, entre el 01/01/2011 y el 31/12/2012. En este caso no fue posible contrastar los valores simulados con otra cuenca monitoreada confiablemente en todo el rango de variación de caudal, por lo cual se aceptaron valores de los parámetros similares a la bibliografía consultada en cuanto a que el caudal medio anual se viera incrementado, como se plantea en Iroumé et al. (2006); Bruijnzeel, (2004) y Bosch and Hewlett (1982). Como plantean los autores la principal razón para este incremento es la reducción en la intercepción del dosel forestal, que conlleva una reducción importante en la evapotranspiración luego de la cosecha.

Ambas simulaciones se representan en la Figura 14, donde se observa que los períodos de caudal nulo son frecuentes en la primer etapa previa a la cosecha y por el contrario, la cuenca tiene respuestas más marcadas a la precipitación en el segundo período, luego de la cosecha.

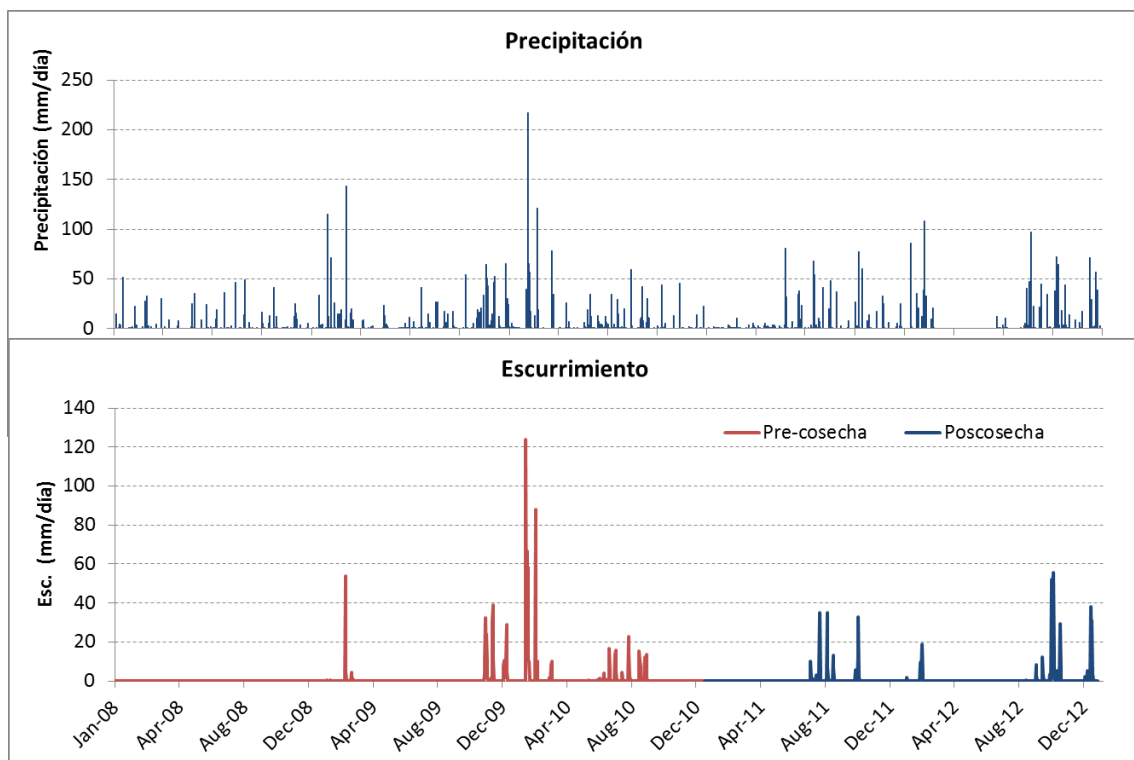


Figura 14- Series diarias de Precipitación registrada y escurrimientos simulados pre y pos-cosecha en la cuenca Santo Tomás 1

6.4.2 Módulo de transporte de sedimentos

El módulo de transporte de sedimentos fue incorporado una vez que se obtuvieron resultados aceptables para el módulo hidrológico. Se trabajó con los parámetros mencionados como los más relevantes, de forma de simular en cada período tasas de erosión similares a las reportadas por la técnica del 137Cs, en cada etapa.

En la Tabla 24 se presentan los valores medios anuales de tasas de erosión simuladas en la cuenca para ambos períodos, así como el promedio de cada período.

Tabla 24- Resultados de la simulación de los dos períodos en SHETRAN

Período	Año	Precipitación (mm)	Escorrentamiento (mm)	Coef. escorrentía	Y (ton/ha.año)
Pre- cosecha	2008	767	4	1%	0
	2009	1506	316	21%	1.4
	2010	1410	650	46%	4.0
Promedio Pre-cosecha		1228	323	23%	1.8
Pos- cosecha	2011	994	429	43%	1.8
	2012	1463	873	60%	3.9
Promedio Pos-cosecha		1229	651	51%	2.9

Como se observa, el coeficiente de escorrentía medio del período pos-cosecha aumenta un 121% respecto al del período pre-cosecha. A nivel medio anual las tasas de producción de sedimentos simuladas en la cuenca fueron de 1.8 ton/ha. año para el período de plantación forestal adulta y 2.9 ton /ha. año para el período pos-cosecha, es decir que de acuerdo a la simulación luego de la cosecha la producción de sedimentos en la cuenca aumento en un 61%.

En la Figura 15 se presentan integradas para una mejor visualización las series diarias de Precipitación registrada, caudal y producción de sedimentos simulados en la cuenca, para el período de cobertura de monte forestal, mientras que en la Figura 16 se presenta la misma comparación para el período pos-cosecha.

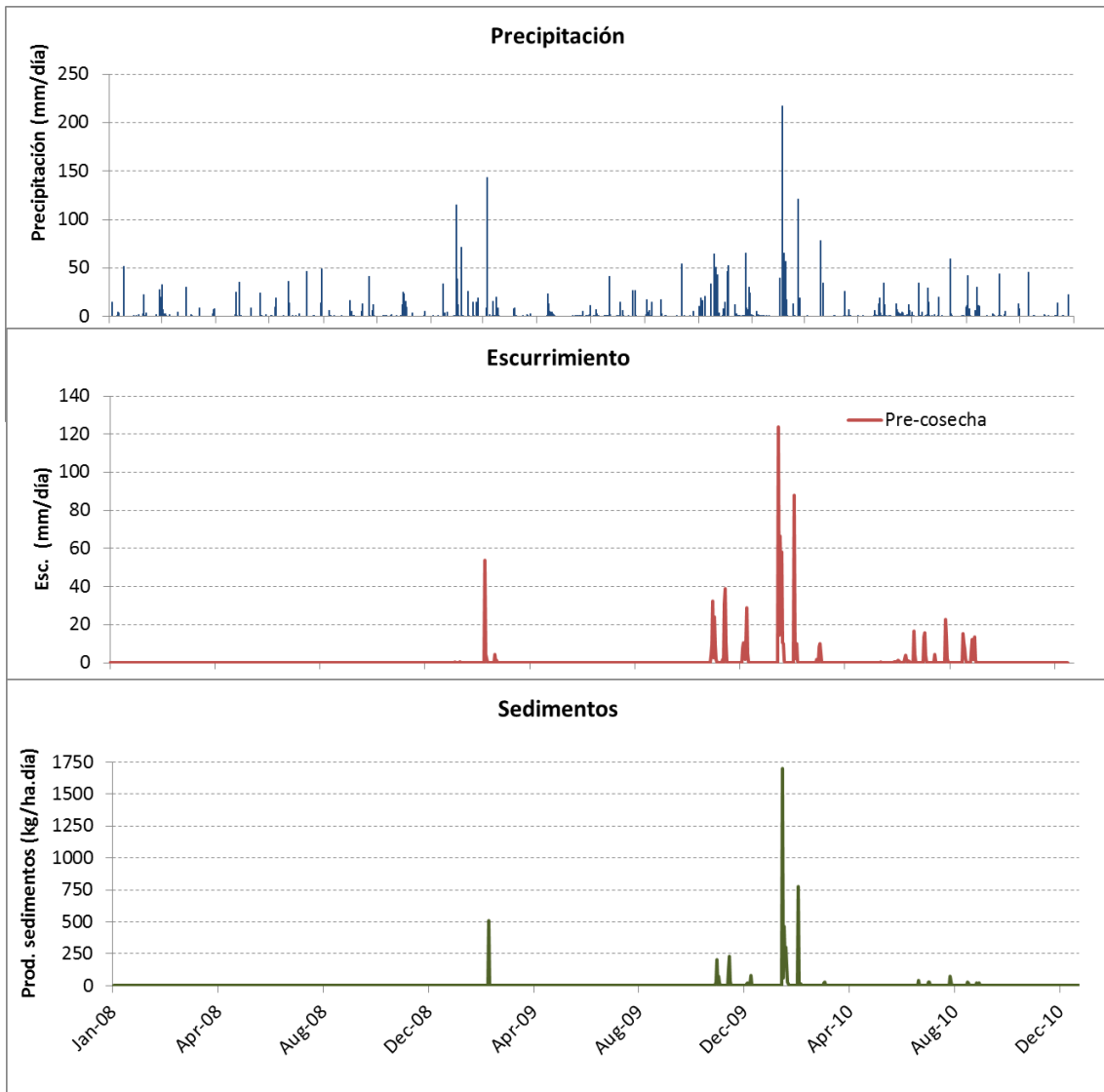


Figura 15- Series diarias de Precipitación registrada, escurrimiento y producción de sedimentos simulados Pre-cosecha en la cuenca Santo Tomás 1

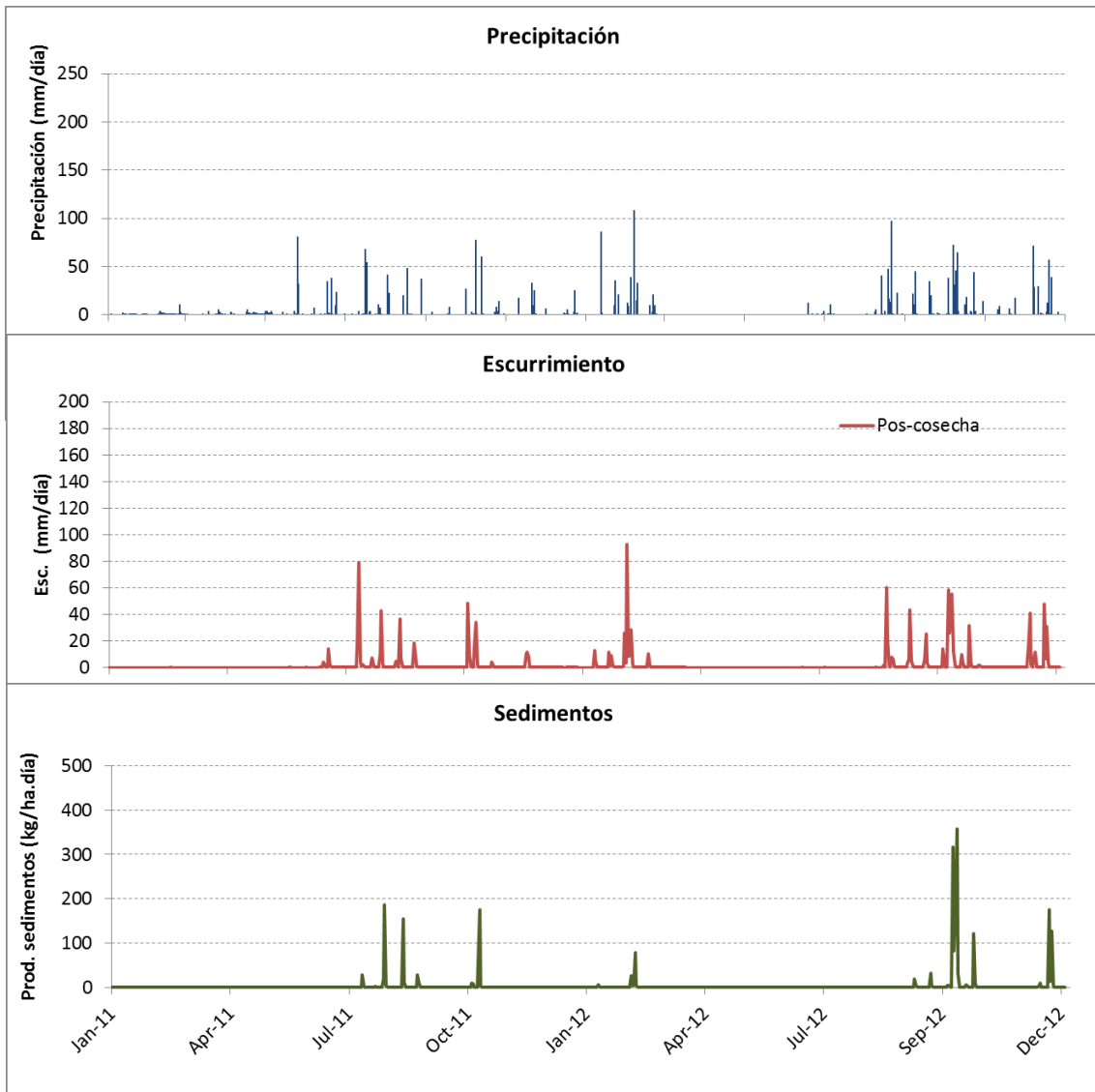


Figura 16- Series diarias de Precipitación registrada, escurrimiento y producción de sedimentos simulados Pos-cosecha en la cuenca Santo Tomás 1

Finalmente y a modo de caracterización del efecto del cambio de uso del suelo se presenta en la Figura 17, la relación doble-masa entre ambas simulaciones para todo el período de registro de Precipitación

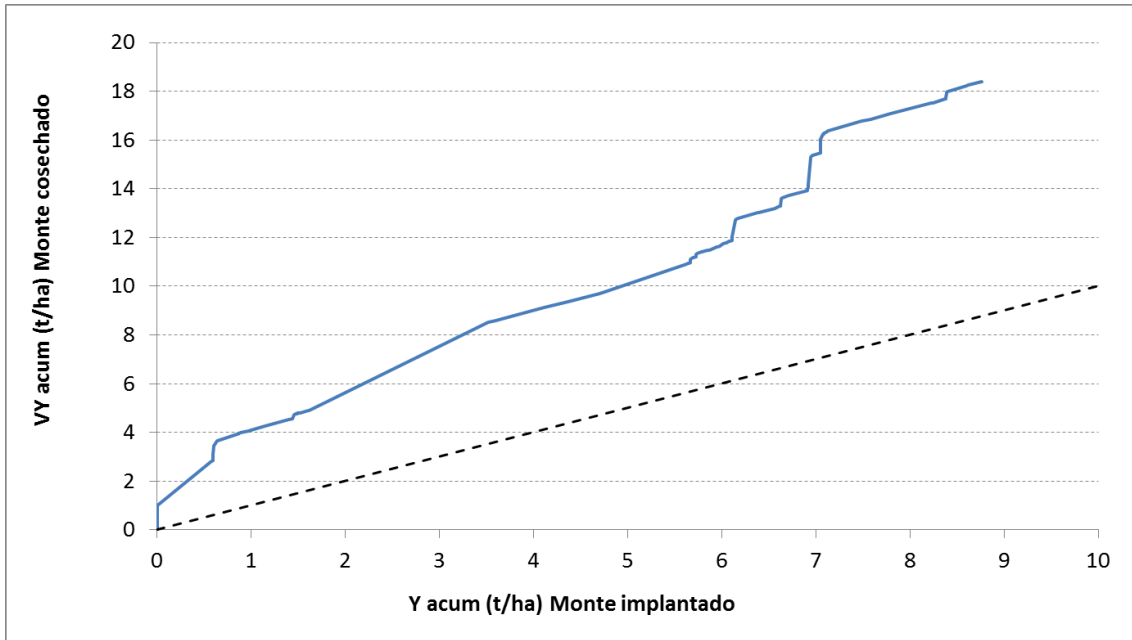


Figura 17- Comparación de simulaciones de tasa de producción de sedimentos acumulada para las dos coberturas analizadas en el período completo de registro

Se observa que si bien al final del período la producción de sedimentos en la situación de cosecha casi duplica a la del monte implantado, las mayores diferencias se dan en los momentos puntuales de eventos de precipitación significativos, siendo que la producción de sedimentos se mantiene similar en ambas condiciones cuando la precipitación no supera los 40 a 50 mm/día.

7. Conclusiones y Actividades Futuras

La técnica del ^{137}Cs para establecer tasas de erosión y sedimentación fue aplicada por primera vez en cuencas forestadas del Uruguay, con el objetivo de evaluar el cambio en la producción de sedimentos debido a la cosecha de *Eucalyptus*.

El estudio se desarrolló en dos cuencas similares sometidas a la cosecha completa durante el año 2010. En un sitio de referencia elegido, que se considera sin erosión y en las dos cuencas se cuantificó la actividad del radionucleido ^{137}Cs en el perfil del suelo. En cada cuenca se muestrearon tres puntos en una transecta en el sentido de la pendiente, con el objetivo de representar los procesos de erosión: ladera alta, media ladera y bajo. El muestreo así diseñado se realizó antes y después de la cosecha en ambas cuencas. El inventario total medido en el sitio de referencia fue de 437 Bq/m^2 . Los sitios que presentaron inventarios menores indicaron erosión mientras que los que presentaron actividad acumulada mayor indicaron sedimentación, en general éstos últimos fueron los puntos en la zona baja de ambas transectas.

Los modelos de conversión actividad de ^{137}Cs -erosión reportaron, para los niveles de actividad de ^{137}Cs medidos, en la etapa pos-cosecha tasas de erosión del orden del doble de las tasas del período pre-cosecha. En particular el modelo de conversión basado en los procesos de difusión y migración del ^{137}Cs en el suelo, reporta los valores que pueden considerarse más cercanos a la realidad 1.8 y 3.9 t/ha. año respectivamente. Sin embargo debe considerarse que la tasa de erosión estimada mediante esta metodología es representativa de lo ocurrido desde el año 1963 en adelante. Por esto en el valor estimado para las condiciones de ST1 Pre-cosecha se integra en forma ponderada la tasa media de erosión en las pasturas nativas durante los primeros 35 años, y la tasa media de los siguientes 12 años correspondientes al establecimiento y desarrollo de la plantación forestal. De la misma forma el valor estimado para ST2 pos-cosecha integra en la ponderación los dos últimos años correspondientes a la cosecha de la plantación forestal y su posterior re-plantación.

En cuanto a la modelación hidrológica de los escurrimientos y de la producción de sedimentos en la cuenca, el modelo SHETRAN fue implementado en la cuenca de Santo Tomás 1 para ambas condiciones de cobertura vegetal: monte adulto de eucaliptos y monte cosechado con residuos en superficie. En ambos casos se obtuvieron resultados satisfactorios, observándose un aumento en el coeficiente de escorrentía simulada pos-cosecha de 121% respecto a las condiciones pre-cosecha y un aumento en la producción media anual de sedimentos de 61 %, como resultados del mismo cambio de cobertura. Las diferencias producidas se deben exclusivamente al cambio en los parámetros del modelo inherentes a la vegetación, permaneciendo los restantes parámetros incambiables.

Las actividades en la zona de estudio continuarán desarrollándose por parte del equipo de investigadores que llevó adelante este Proyecto. Se trabajará ampliando la base de datos para la aplicación de la técnica del ^{137}Cs e incorporando otros radionucleidos y en el marco de un proyecto internacional, participando en la primer experiencia en Uruguay en aplicación de la técnica de, CSSI (Compound Specific Stable Isotope). El plan de trabajo comprende las siguientes actividades:

- Actualmente este grupo de investigación se encuentra ejecutando el Proyecto “Red de microcuencas experimentales para la obtención de indicadores hidrológicos y edáficos en plantaciones forestales”, del Programa ANII Alianzas para la Innovación. Dentro de sus objetivos específicos se encuentra cuantificar las pérdidas de suelo y nutrientes por erosión en plantaciones forestales tomando como patrón de comparación el uso del suelo en pastoreo. La técnica de trabajo será la desarrollada durante este proyecto, Se prevé para esto en primer lugar completar al menos dos transectas más en la

cuenca Santo Tomás objeto de este estudio, y complementariamente se trabajará durante la etapa de cosecha de la plantación forestal de otra microcuenca de la Red, prevista para mediados del año 2014.

- Adicionalmente el Centro de Investigaciones Nucleares de Facultad de Ciencias, participa del Proyecto RLA2012016 financiado por la OIEA “Mejoramiento de estrategias de conservación de los recursos suelo y agua a nivel de cuencas para fortalecer la seguridad alimentaria de América Latina y El Caribe a través de la aplicación integrada de las técnicas FRN, CSSI y MIRS” Dicho proyecto vincula a 20 países de América Latina y el Caribe con el objetivo de aumentar la información disponible en relación a degradación de los recursos agua y suelo con el objetivo de mejorar las políticas y estrategias agrícolas. Uruguay ha propuesto como sitio de estudio para este Proyecto las cuencas que forman parte de la Red del Proyecto ANII- Alianzas, entre ellas la que fue objeto de este estudio. En ese marco se complementarán los muestreos realizados para el trabajo con la técnica de FRN, incorporando el radionucleido ^{210}Pb al estudio.
- En forma transversal a estos proyectos se continuará con las actividades del Doctorado de Jimena Alonso (en desarrollo) en el cual se avanzará sobre la modelación de la producción de sedimentos en cuencas, con base en la técnica de los FRN y CSSI.

8. Bibliografía

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., and Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE" 2: Structure of a physically based distributed modelling system. *J. Hydro.*, Amsterdam, 87, 61-77.
- Alonso, J.; Silveira, L. Modelación del cambio de uso del suelo en microcuencas experimentales en Uruguay: validación del modelo SHETRAN. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 2008, Cartagena de Indias, Colombia. 2008.
- Andrello, A.; Guimaraes, M.; Appoloni, C. and do NascimentoFilho, V. 2003. Use of Cesium-137 methodology in the evaluation of superficial erosive processes. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. Vol 46, n. 3: pp. 307-314. ISSN 1516-8913.
- Bathurst, J.; Moretti, G.; El-Hames, A.; Beguería, S, y garcía-Ruiz, J. 2007. Modelling the impact of forest loss on shallow landslide sediment yield, Ijuez river catchment, Spanish Pyrenees. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(1), 569-583.
- Beven, K., Freer, J. (2001). "Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology". *J. Hydrol.* 249, 11-29.
- Bosch, J.M., Hewlett, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.* 55, 3-23.
- Clérici, C., García Préchac, F. 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. *Agrociencia* 5(1): 92-103
- Ewen, J., Parkin, G., O'Connell, P.E. 2000. "SHETRAN: Distributed river basin flow and transport modelling system". *Journal of Hydro Engineering*, 3, 250-258.
- García Préchac, F. 1992. Guía para la toma de decisiones en conservación de suelos, 3ra aproximación. Serie Técnica Nº26 INIA, Uruguay 63p.
- García Préchac, F., Clérici, C. y Denis, V. 1997. Actualización de la información para el uso del modelo USLE-RUSLE en Uruguay, p1-10, In F. García Préchac (Ed) *Curso de Actualización Técnica sobre Siembra Directa y Conservación de Suelos*, FA (UdelaR), U de Ed Perm, cod Nº 438.
- García Préchac, F., Clérici, C. y Terra, J.A. 1999. Avances con USLE-RUSLE para estimar erosión y pérdida de productividad en Uruguay. In 14º Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Pucón, Chile 835p.
- García Préchac, F., Clérici, C., Brignoni, A. 2005. Erosión versión 5.0. Programa de computación para el uso de la USLE/RUSLE en la Región Sur de la Cuenca del Plata. Versión operativa en Windows. DINAMA UNDP, proyecto URU/03/G31, disponible en <http://www.fagro.edu.uy/~manejo/>.
- García Préchac, F., Echeberría, R. y Lanfranco, B. 1996. EROSIÓN versión 3.0, Programa de computación para el uso de la USLE en la Región del Plata. XIII Congreso Latinoamericano de la

Ciencia del suelo, 4-8 agosto, Aguas de Lindòia, SP, Brasil, Soc. Latinoam de la C del Suelo-Soc. Internac de la C del Suelo.

Iroume, I., Mayen, O. and Huber, A. (2006) Runoff and peak flow responses to timber harvest and forest age in southern Chile, *Hydrological Processes*, 20, 37-50

J. Juri Ayub, D.E. Di Gregorio, H. Velasco, H. Huck, M. Rizzotto, F. Lohaiza. 2010, "Short-term seasonal variability in ⁷Be wet deposition in a semiarid ecosystem of central Argentina." *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 100, Issue 11, November 2009, Pages 977-981

Pacini, A.A.; I.G. Usoskin, H. Evangelista, E. Echer, R. de Paula. 2010, "Cosmogenic isotope ⁷Be: A case study of depositional processes in Rio de Janeiro in 2008-2009". *Advances in Space Research*, Volume 48, Issue 5, 1 September 2011, Pages 811-818

Puentes R. 1981. A framework for the use of the Universal Soil Loss Equation in Uruguay. MSc Thesis. Texas A&M University. College Station, Texas.

Renard, K.G.; Foster, G.R.; Weesies, G.A.; McCool, D.K.; Yoder, D.C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In: A.R.S. USDA, (ed). Vol Agriculture Handbook Number 703.

Ritchie, J. C., & Ritchie C. A. (2001). Bibliography of publications of studies related to soil erosion and sediment deposition, <http://hydrolab.arsusda.gov/cesium/>

Schuller, P et al. 2006, "Changes in soil erosion associated with the shift from conventional tillage to a no-tillage system, documented using ¹³⁷Cs measurements". *Journal of Environmental Radioactivity* 94 (2007)

Schuller, P et al., 2010, "Use of beryllium-7 to study the effectiveness of woody trash barriers in reducing sediment delivery to streams after forest clearcutting" *Soil and Tillage Research* 110 (2010)

Schuller, P., Ellies, A., Castillo, A., Salazar, I. 2003. Use of ¹³⁷Cs to estimate tillage- and water-induced soil redistribution rates on agricultural land under different use and management in central-south Chile. *Soil & Tillage Research* 69, pp. 69-83. Elsevier

Silveira, L.; Chreties, C.; Alonso, J.; Amorín, C; De Izaguirre, P.; Crisci, M.; Symonds, S; Martínez, L.; García Petillo; García Prechac, F; Delgado, S.; Clérics, C.; Bentancor, L.; Hill, M.; Alliaume, F.; Iroumé, A; Huber, A.; Cabral, P; Audicio, P. 2011. Efectos de la actividad forestal sobre los recursos suelos y aguas, Serie Técnica INIA. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA, Montevideo.

Terra, J.A. y García Préchac, F. 2001. Siembra Directa y rotaciones forrajeras en las Lomadas del Este. Síntesis 1995-2000. Serie Técnica INIA Nº 125.

Walling, D, E., & He, Q. 1999. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal of Environmental Quality*, 28, 611-622. Walling et al., 1999;

Walling, D. E., & He, Q. (2001). Models for converting ¹³⁷Cs measurements to estimates of soil redistribution rates on cultivated and undisturbed soils (including software for model implementation). Report to IAEA. Exeter: University of Exeter.

Walling, D. E., & Quine, T. A. (1990). Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Degradation and Rehabilitation*, 2, 161–175.

Walling, D.E.; He, Q. and Appleby P.G. 2003. Chapter 7, Conversion models for use in soil-erosion, soil-redistribution and sedimentation investigations, In: *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002. ISBN: 0-306-48054-9; 1-4020-1041-9.

Wicks. J.M.; Bathurst, J.C. 1996. SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system. *Journal of Hydrology* 175 (1996) 213-238

Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide for conservation planning. USDA Agr. Handbook N° 537. Washington. 58 pp.

Zapata, F. 2002. *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002. ISBN: 0-306-48054-9; 1-4020-1041-9.

Zapata, F., & García-Agudo, E. (2000). Future prospects for the ¹³⁷Cs technique for estimating soil erosion and sedimentation rates. *Acta Geológica Hispánica*, 35, 197–205.

Zhang, X. B., Higgitt, D.L., & Walling, D. E. (1990). A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China. *Hydrological Science Journal*, 35, 267–276.

ANEXO – Publicaciones

Se adjuntan en este anexo las dos publicaciones generadas hasata el momento en el marco del Proyecto:

Alonso, J.; Audicio, P.; Martínez, L.; Scavone, M; Rezzano, E. 2012. Comparison of measured Cs-137 data and USLE/RUSLE simulated long-term erosion rates. *Agrociencia (Uruguay), Special issue. vol.: 16 2 1, p.: 261 -267.*

Scavone, M; Martínez, L.; Audicio, P.; Alonso, J. El Cs137 como indicador de la erosión hídrica en suelos en el Uruguay. *Anales de las XIX Jornadas de Jóvenes Investigadores AUGM, Ciudad del Este, Paraguay, 2011*