

**Universidad:** Universidad de la República, Uruguay.

**Facultad/Centro/Instituto:** Facultad de Ingeniería / Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental.

**Título del Trabajo:** EL CS137 COMO INDICADOR DE EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS EN EL URUGUAY

**Autor/es:** Martín Scavone, Paola Audicio, Leticia Martínez, Jimena Alonso.

**Nivel de formación del investigador principal:** Estudiante

**Orientador (si lo hubiere):** Jimena Alonso

**Núcleo Disciplinario/Comité Académico/Otros Temas:** Aguas

**Correo electrónico del autor principal:** mscavone@fing.edu.uy

**Palabras Clave:** Erosión, cuencas, forestación. Erosão, bacia hidrográfica, florestamento.

### **Resumen:**

En los últimos 20 años, la alta demanda mundial de materia prima forestal y la conjunción de condiciones agronómicas y climáticas propicias han inducido en el Uruguay un crecimiento de gran magnitud de la actividad forestal. Pretendiendo un crecimiento de la forestación apegado a la gestión sustentable de los recursos naturales –aguas y suelos- se hace necesario el estudio de los efectos sobre éstos que la forestación impone. La investigación en tecnología nuclear llevó al desarrollo de un método de cuantificación de la pérdida de suelos en un área mediante la medición de actividad de radioisótopos inmersos en la masa de suelos. El presente informe expone los primeros resultados de una experiencia piloto de conteo de  $^{137}\text{Cs}$  como trazador de erosión de suelos en el marco de una línea de investigación basada en la cuantificación de la erosión debida al cambio de uso del suelo, en particular la actividad forestal.

### **Antecedentes:**

Desde el año 1998, el grupo de investigadores de la Red Temática de Ingeniería Agrícola de la Universidad de la República, desarrolla una línea de investigación relacionada a los indicadores hidroambientales de los efectos de los cambios de uso de suelo, en particular la forestación, sobre los recursos naturales: agua y suelo. Se ha trabajado utilizando la metodología de comparación de microcuencas (tales son consideradas unidades de estudio) con distinta cobertura vegetal y manejo siguiendo programas de monitoreo que abarcan una amplia gama de parámetros: cantidad y calidad de aguas de lluvia, cantidad y calidad de aguas en cauce, caudales y escurrimientos en eventos, redistribución de la precipitación e interceptación, monitoreo de la napa subterránea, medidas de pérdida de suelo en cuenca y en cauce, modificación de las propiedades de los suelos, etc.

El fenómeno de sedimentación, asociado a la erosión hídrica de los suelos, induce la colmatación de cauces y cuerpos lénticos de agua, reduciendo su capacidad de regulación hidrológica y causando alteraciones en la calidad físico- química e hidrobiológica del agua. La erosión de los suelos es además un elemento central determinante de la sustentabilidad de los sistemas de producción agropecuarios por sus efectos directos e indirectos en el descenso de la productividad y la rentabilidad de los cultivos. La interacción entre las condiciones climáticas y las prácticas agrícolas es determinante en las pérdidas de suelos y de nutrientes por erosión hídrica, incidencia que podría incrementarse si aumenta la frecuencia e intensidad de las lluvias en la región por efecto de un cambio climático global (SWCS, 2006)

La estimación de la producción de sedimentos por erosión se ha resuelto tradicionalmente mediante el uso de modelos empíricos como USLE y su versión corregida RUSLE (Renard et al, 1997). Este modelo, objeto de extensos trabajos de calibración y corrección de sus parámetros a fin de adaptarlo a las condiciones propias del Uruguay, (Puentes, 1981; García Préchac et al., 1999; Terra y García Préchac, 2001, Clérico y García Préchac, 2001) se ha impuesto como la herramienta de mayor utilización a nivel local para la estimación de la erosión laminar. Los modelos hidrológicos de transporte de agua y sedimentos, espacialmente distribuidos tanto de base física (SHETRAN), como empírica (SWAT) han cobrado relevancia en la última década ya que permiten obtener información sobre la distribución espacial de la erosión en la cuenca.

Por otra parte la obtención de información necesaria para la validación de cualquiera de los modelos mencionados implica la medición de la erosión en campo o su estimación a partir de indicadores, por ejemplo la determinación de la concentración de radioisótopos dentro de la masa. En particular este procedimiento consiste en comparar las concentraciones (mediante el conteo de actividad de emisión nuclear) de los radioisótopos en una muestra representativa de una porción de suelo en un predio propenso a sedimentación o erosión. Los radioisótopos que con mayor recurrencia son seleccionados como trazadores de erosión son: Cesio 137 –antropogénico, emitido a la atmósfera desde la década de 1950, fruto de las diversas pruebas atómicas llevadas a cabo antaño-, Plomo 210, natural, resultado del decaimiento del Uranio 238- y Berilio 7 –natural, proveniente del bombardeo de radiación cósmica. Estudios llevados a cabo en 1960 por Menzel señalaron la correlación entre la pérdida de Radioisótopos y erosión de suelos –en su caso, el trazador usado era <sup>90</sup>Sr. En las décadas de 1960 y 1970, diversos investigadores encuentran un comportamiento similar para el <sup>137</sup>Cs, caracterizándolo como trazador de niveles de redistribución de suelos (Zapata, 2002). A nivel regional –países del Cono Sur-, está difundido el empleo de técnicas de conteo de actividad de isótopos radioactivos, en particular <sup>137</sup>Cs y <sup>7</sup>Be (Schuller et al, 2003; Schuller et al, 2006; Schuller et al, 2010; Juri Ayub et al, 2008; Pacini et al., 2010).

Si bien la mayor limitación del método pasa por la necesidad de contar con instalaciones de laboratorio con equipamiento especializado y costoso junto con un equipo técnico especializado, entre las ventajas destacables de esta metodología (Zapata, 2002), destacan:

a) Los resultados del modelo son valores medios, resultado de eventos ocurridos sobre el suelo en el período comprendido por los últimos 50 años, están poco influenciados por la ocurrencia de eventos meteorológicos e hidrológicos extremos.

b) Las tasas de redistribución de suelos son representativas de las consecuencias de todos los procesos que se llevan a cabo en el terreno bajo determinados parámetros de utilización por el hombre.

c) El procedimiento genera guarismos tanto de erosión como de deposición de sedimentos en la cuenca hidrológica de estudio, pudiendo determinarse una tasa de eliminación de sedimentos neta.

d) A partir de la interpretación de los datos recabados, el modelo tiene la capacidad de cuantificar la magnitud de los procesos de erosión inducidos por los eventos naturales o antropogénicos que sobre la masa se producen tales como laboreo o escurrimiento superficial.

### **Objetivo:**

Evaluar la factibilidad de la utilización del  $^{137}\text{Cs}$  como indicador de la redistribución de suelos y con ello de la erosión debida al cambio de uso de suelos

### **Materiales y Métodos:**

Basándose en el hecho de que la cuenca hidrológica integra los procesos de escorrentía superficial y erosión de planicies, laderas y canales naturales bajo una única o múltiples condiciones de tipo –relieve y geología- y uso de suelo, cobertura vegetal existente es que se recomienda su uso como unidad de estudio (SWCS, 2006).

Es de primordial interés para la mejor comprensión del impacto de la forestación en el recurso suelo, la cuantificación de la erosión hídrica en los períodos de tiempo en que las áreas de terreno donde se practica dicha actividad son más vulnerables; éstos coinciden con los eventos de plantación y cosecha del monte forestado. Para la aplicación de la técnica del conteo de actividad de radioisótopos se eligieron dos hitos relevantes en el cambio de uso que implica la actividad forestal: la plantación y la cosecha de un monte. Para ello se realizarán muestreos con miras a determinar la actividad del radioisótopo en el perfil del suelo antes y después de cada tarea.

### **Área de estudio:**

Las microcuencas de estudio se encuentran en el litoral oeste del Uruguay, más precisamente al norte del departamento de Río Negro. Las cuatro microcuencas seleccionadas forman parte de un programa de monitoreo continuo de variables hidrológicas y meteorológicas, destacándose el seguimiento desde el año 2007 de los regímenes de precipitación, escorrentía, variables meteorológicas y evolución del nivel freático.



Figura 1 – Localización del área de estudio

Por una parte, se dispone de dos microcuencas en el establecimiento Santo Tomás (en adelante ST1 y ST2), ubicadas, a 19 km de la localidad de Guichón. El predio delimitado operó bajo plantación de *Eucalyptus* del tipo *globulus*, implantada en el otoño-primavera del año 1998 con una densidad de 895 árboles por hectárea. Las fechas de cosecha correspondientes a cada microcuenca son: Verano de 2009 - 2010 para ST1 y Primavera 2010 para ST2, realizándose éstas en diferentes condiciones de humedad de los suelos. Los suelos están conformados a partir de areniscas, con cemento arcilloso, de tonalidades mayoritariamente rosas, presentándose coloración rojiza o grisácea en algunos miembros. El relieve de la superficie corresponde a pendientes suaves, del orden de 1 a 3%. La fertilidad de estos suelos es baja. Respecto a la geología de las microcuencas de estudio, se clasifica como perteneciente a las formaciones Ascencio y Mercedes (edad: Cretácico superior). Dichas rocas son areniscas finas a medias, junto a areniscas arcillosas, ferrificadas, cementadas con carbonatos.

Por otra parte, las dos microcuencas de estudio en el establecimiento La Nueva Esperanza (en adelante LNE1 y LNE2), están ubicadas a 17 km de la localidad de Guichón. Los suelos de esta microcuenca son mayoritariamente originados de rocas areniscas cementadas, identificadas como Formación Mercedes, asimismo, se encuentra suelos de origen calcáreo (Fm. Mercedes) y areniscas ferrificadas (Fm. Ascencio). El relieve de las microcuencas, por otra parte puede describirse como mesetiforme, laderas de pendiente variable entre 6% y 12 % con cimas aplanadas (pendientes del orden de 1%) Respecto a la geología presente en estas microcuencas, el material predominante en la zona de mayor elevación son rocas areniscas de la Fm Mercedes. En el extremo Sudeste de la microcuenca, aflora la arenisca ferrificada de la formación Ascencio. Ambas microcuencas se han mantenido desde el inicio de su monitoreo con vegetación de pradera con baja densidad de maleza, hasta este otoño (mayo de 2011) en que la microcuenca LNE2 se ha forestado con Eucaliptus del tipo *globulus sp. Maidenni*

La siguiente tabla resume los principales parámetros geométricos de las cuatro microcuencas de estudio.

Tabla 1 – Características físicas de las microcuencas

Establecimiento	Santo Tomás		La Nueva Esperanza	
	ST1	ST2	LNE1	LNE2
Coord punto de Cierre (UTM 21H)	467879.32 m E; 6407215.74 m S	468480.42 m E; 6405279.62 m S	485548.08 m E; 6403500.45 m S	485674.23 m E; 6403492.39 m S
Área (Há)	97	117	11.57	22.01
Long cauce (km)	1.232	1.477	0.6345	0.7703
Pend. cuenca	3.80%	3.50%	7.2%	7.6%
Tiempo de concentración	25min	31min	9min	11.1min

### **Medición de radioactividad del suelo con trazador $^{137}\text{Cs}$**

Un aspecto que debe siempre tenerse en cuenta a la hora de efectuar el estudio de erosión del suelo es la necesidad de definirse un sitio de toma de muestras de referencia. Si no se dispusiere de éstos, la medición de actividad de  $^{137}\text{Cs}$  solamente podría proporcionar medidas relativas de distribución de suelos –indicando a modo comparativo entre diversos puntos del terreno donde es máxima o mínima la pérdida o acumulación de suelos-, y no una expresión cuantitativa de la masa de suelo desplazada. El sitio de referencia proporcionará el perfil de concentración del radioisótopo en el suelo, el cual, comparado con su análogo extraído en una segunda locación, permite cuantificar la magnitud de la pérdida de suelos. La investigación ha dispuesto de una serie de condiciones necesarias a ser cumplidas por un sitio del predio de estudio si se eligiese a éste como un punto de referencia. Las principales condiciones a ser cumplidas por un sitio de referencia (Zapata, 2002) se resumen a continuación:

- 1) El sitio de referencia no debió haber sufrido pérdida o ganancia de masa de suelo en los últimos 60 años.
- 2) La cubierta vegetal del área debe de haberse mantenido invariante en el mencionado período. Cubierta vegetal óptima: “Pasturas verdes”
- 3) El suelo en el sitio de referencia no debe haber sido laboreado por el hombre.

En el año 2007, con el comienzo de los estudios, se seleccionó un sitio para toma de muestras de referencia en las microcuencas ST1 y ST2. El mencionado sitio se halla en uno de los cortafuegos de pasto natural sin modificación que circundan al monte artificial. Una vez seleccionado el sitio de referencia, debe procederse a la recolección de muestras de suelo para su posterior tratamiento en laboratorio. De las metodologías recomendadas por Zapata (2002) se ha optado por la que contempla la inserción en la masa de suelo de testigos de pared cilíndrica de 5cm de altura, extrayéndose el volumen de 10 testigos conforme se avanzaba 5 cm en profundidad en la masa. La Figura 2 muestra un testigo aún inserto en la masa de suelo. La foto fue tomada durante el muestreo de suelos en LNE1, cada muestra a ser estudiada está conformada por el material extraído con 10 de estos cilindros, hincados en el suelo a golpe seco.



Figura 2 – Muestreo de suelos

En las microcuencas LNE1 y LNE2, debido a la irregularidad de la morfología del terreno de la microcuenca, se optó por muestrear abarcando zonas de Cresta, Pendiente y Valle. El objetivo de este diseño de muestreo es poder efectuar evaluación de pérdida, transporte y deposición de sedimentos en la microcuenca. El punto elegido en la cresta de la pendiente cumple la condición de encontrarse en el borde exterior de la zona a ser plantada, los conteos de  $^{137}\text{Cs}$  estimarán la erosión inducida en el suelo por el monte plantado.

La preparación y el análisis de actividad de las muestras se ha llevado a cabo en las instalaciones del Centro de Investigaciones Nucleares –CIN- de la Facultad de Ciencias

UdelaR. Las fases de preparación de las muestras, acorde a los lineamientos compilados en el manual de Zapata, son:

- 1- Recepción, secado al aire libre y desagregación de la muestra.
- 2- Tamizado de la muestra seca, ésta debe filtrarse por un tamiz 2mm, se cuantificará la masa de material pasante (suelo fino) y de material rocoso (fragmentos de roca, retenidos).
- 3- Determinación de la densidad en seco de la fracción pasante del suelo. Puede ésta determinarse a partir del estudio (comparación de pesos húmedo y secado en horno a 105<sup>o</sup>) de la totalidad de la muestra a evaluar o de una sub-muestra obtenida de la primera mediante procedimiento de cuarteo

La actividad del <sup>137</sup>Cs en las muestras de suelo recabadas se midió mediante el uso de un contador de Germanio ultrapuro –HPGe-, en las instalaciones del CIN. Se recomienda (Zapata, 2002) efectuar la medición de <sup>137</sup>Cs con la mayor masa de suelo posible (para la cual se dispondrá de las geometrías con mayor volumen) a efectos de que el HPGe disponga de un mayor número de fotones para ser contados y con ésto alejarse del valor de actividad mínima medible. La actividad del <sup>137</sup>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 –actividad conocida-.

### **Resultados:**

La tabla siguiente contiene de forma esquemática los valores de densidad aparente y los resultados del conteo de actividad del perfil de suelo extraído del sitio de referencia de Santo Tomás 1. Junto a ésta, se agrega los resultados del muestreo del suelo –humedad y densidad aparente- del potencial sitio de referencia de Santo Tomás 2.

Tabla 2 – Resultados sitios de referencia Santo Tomás

Prof. (cm)	Referencia ST1 (2007)		Referencia en ST2 (2009)	
	Densidad Ap. (g/cm <sup>3</sup> )	Actividad (Bq/kg)	%Humedad	Densidad Ap. (g/cm <sup>3</sup> )
0-5	1.17	1,6	18.72	1.32
5-10	1.52	2,2	11.62	1.55
10-15	1.60	1,1	11.91	1.56
15-20	1.53	0,7	12.83	1.56
20-25	1.56	0,3	14.05	1.57
25-30	1.54	0,2	14.41	1.57
30-35	1.53	0	17.49	1.57
35-40	1.42	0	25.79	1.41
40-45	1.38	0	26.86	1.41

En la tabla 3 se muestra un extracto (correspondiente a ladera media) de los resultados de medición de humedad y densidad aparente de los suelos muestreados en la zona de evaluación de erosión en las microcuencas Santo Tomás. Para el muestreo previo a la cosecha del monte existente en ST1, se incluye el resultado del conteo de actividad de <sup>137</sup>Cs.

Tabla 3 - Evaluación de erosión por cosecha de predio forestado en microcuenca ST1

Prof. (cm)	Medición previa al evento, 10/2/2010			Medición posterior al evento, 22/6/2010	
	% HP	Dap	Act (Bq/kg)	% HP	Dap
0 - 5	27.13	1.25	1,53	26.03	1.25
5 - 10	19.18	1.37	1,44	20.33	1.38
10 - 15	16.16	1.57	0,5	20.01	1.40
15 - 20	16.14	1.50	0,2	20.08	1.41
20 - 25	16.21	1.62	0		
25 - 30	16.59	1.56	0		

Al momento se dispone de las lecturas de actividad de  $^{137}\text{Cs}$  para el sitio de referencia en ST1 y para una de las muestras obtenidas previo a la cosecha de la plantación allí ubicada. La Figura 3 indica el perfil de concentración de dicho radioisótopo en el suelo del sitio de referencia.

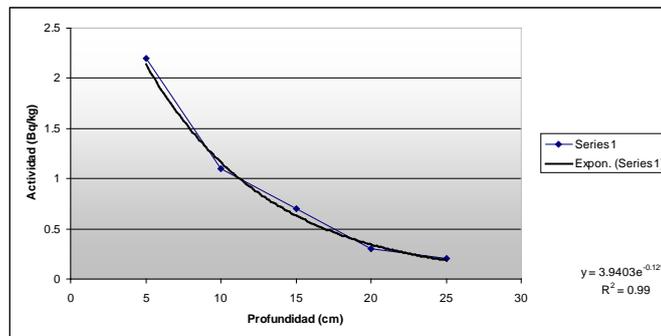


Figura 3 – Perfil de actividad de  $^{137}\text{Cs}$  en profundidad Sitio de referencia ST1

## **Discusión**

La Figura 3 asegura el andamio exponencial decreciente con la profundidad que presenta la concentración de  $^{137}\text{Cs}$  en el suelo. Basándose en los lineamientos expuestos en la bibliografía (Zapata, 2003), puede desprenderse que la elección del sitio de referencia para la microcuenca ST1 ha llevado a un resultado válido.

En la Figura 4, se comparan las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  en la muestra analizada del conjunto extraído en “pre-cosecha” de ST1 con su respectivo perfil de referencia, se obtiene lo siguiente.

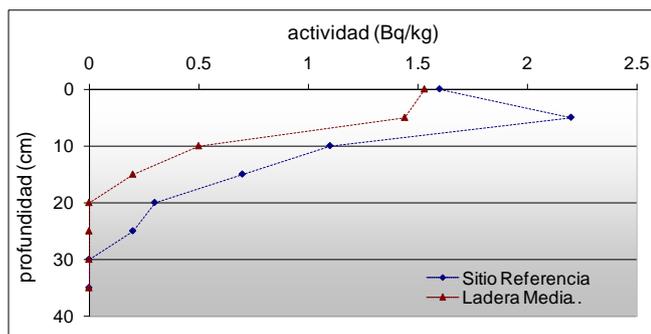


Figura 4 – Comparación de perfiles de actividad en ST1

Observando los andamios de los perfiles de concentraciones de radioisótopo directamente puede desprenderse que hay una pérdida de suelo manifiesta en la zona media de la ladera evaluada. Presentemos la evidencia: el perfil de  $^{137}\text{Cs}$  de la ladera se introduce una menor profundidad en la masa de suelo y con un conteo de actividad menor. Si se asume la hipótesis de que la deposición de  $^{137}\text{Cs}$  atmosférico ocurre siguiendo una distribución uniforme sobre la superficie y que para los dos puntos muestreados la deposición ha comenzado en el mismo momento del tiempo, el hecho que sobre la ladera haya una menor profundidad de suelo con radioisótopo indica que ha habido pérdida de suelo. Se observa que debido a que la deposición del  $^{137}\text{Cs}$  en el suelo apenas ha ocurrido en el último medio siglo, es de esperarse la profundidad del estrato de suelo con contenido de radioisótopo esté en el orden de los 30 a 50 cm (Zapata, 2002). Respecto a la diferencia de valores de actividad para una misma profundidad, sosteniéndose también en la hipótesis de precipitación uniforme en el terreno de  $^{137}\text{Cs}$ , se deduce que el Cesio que “aflora” a nivel de la ladera se ha depositado en un momento anterior a su homólogo en el sitio de referencia. Por lo tanto, en la ladera evaluada está ocurriendo pérdida de los niveles de suelo de menor edad, suelo más superficial.

Respecto al objetivo planteado en este trabajo, esta experiencia piloto que se está llevando a cabo con miras a evaluar el potencial de la técnica de medición de erosión de suelos con radioisótopos está arrojando resultados netamente satisfactorios, las primeras evaluaciones efectuadas con Cesio han devuelto resultados razonables 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 –el conteo de actividad de  $^{137}\text{Cs}$  de una única muestra toma todo un día-, la técnica ha probado en esta primer experiencia ser una herramienta fuerte y confiable a la hora de encarar estudios de redistribución de sedimentos

Siguiendo la línea del proyecto de estudio de erosión y sedimentación de microcuencas afectadas por la actividad forestal, a corto plazo se realizarán los análisis de

actividad del suelo para las demás muestras extraídas de las microcuencas Santo Tomás. Adicionalmente, está previsto el muestreo de suelos para la determinación de un sitio de referencia en las microcuencas LNE 1 y LNE2 y, a posteriori, el tratamiento en laboratorio de las muestras ya extraídas en dicho sitio.

La información de base que surge de éstas mediciones, junto con la información proveniente del programa de monitoreo hidrológico, se incorporarán como insumo en la modelación de la redistribución de los sedimentos desprendidos mediante los modelos SHETRAN y SWAT.

### **Referencias**

- 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
- 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.
- Juri Ayub, J et al., 2010, "Short-term seasonal variability in <sup>7</sup>Be wet deposition in a semiarid ecosystem of central Argentina." *Journal of Environmental Radioactivity* 100, (2009)
- Pacini, A. A. et al, 2010, "Cosmogenic isotope <sup>7</sup>Be: A case study of depositional processes in Rio de Janeiro in 2008-2009". *Journal of Advances in Space Research* (2011)
- 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.
- Schuller, P et al., 2003, "Global fallout <sup>137</sup>Cs accumulation and vertical migration in selected soils from South Patagonia" *Journal of Environmental Radioactivity* 77 (2004).
- Schuller, P et al. 2006, "Changes in soil erosion associated with the shift from conventional tillage to a no-tillage system, documented using <sup>137</sup>Cs 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)
- Sepulveda, A et al., 2008, "Use of <sup>7</sup>Be to document soil erosion associated with a short period of extreme rainfall" *Journal of Environmental Radioactivity* 99 (2008)
- Terra, J.A. y García Préchac, F. 2001. Siembra Directa y rotaciones forrajeras en las Lomadas del Este. Síntesis 1995-2000. Serie Técnica INIA N° 125.
- 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.