



Universidad Austral de Chile  
Facultad de Ciencias Forestales

## **Uso de $^7\text{Be}$ en evaluación del control de erosión y flujo de sedimentos asociados al arrumado de residuos en tala rasa**

Patrocinante: Sra. Paulina Schuller L.  
Co-patrocinante: Sr. Andrés Iroumé A.

Trabajo de titulación presentado como parte de los requisitos para optar al Título de **Ingeniero Forestal.**

**RODRIGO ANTONIO PUEBLA DUARTES**

VALDIVIA  
2008

## CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		<b>Nota</b>
Patrocinante:	Sra. Paulina Schuller L	<u>55</u>
Co-patrocinante:	Sr. Andrés Iroumé A	<u>57</u>
Informante:	Sr. Patricio Carey B	<u>58</u>

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

---

Sra. Paulina Schuller L

## *Agradecimientos*

*El presente trabajo se desarrolló en el marco de los siguientes proyectos de investigación:*

*FONDECYT 1060119 “Uso de  $^7\text{Be}$  en la evaluación de eficiencia de prácticas de manejo en el control de la erosión y flujo de sedimentos a cursos de agua durante el período siguiente a la cosecha a tala rasa de plantaciones forestales”*

*DID-UACH S-200612 “Uso de  $^7\text{Be}$  para evaluar redistribución de suelo en áreas sometidas a cosecha forestal”*

*IAEA CHI-12321 “Use of fallout radionuclides to estimate soil redistribution rates in south-central Chile”*

*Se agradece a las instituciones patrocinantes de los proyectos mencionados por el generoso apoyo brindado a esta investigación.*

## *Agradecimientos*

*Quiero agradecer a Dios por su especial cariño por mí, ya que Él es lo más importante en mi vida. A mis padres Francklin y Ana María, porque sin su constante apoyo y estímulo no hubiese podido realizar éste trabajo.*

*A Matías la luz de mis ojos quien llegó a iluminar mi vida. A mis amigos Carlos, Vicente, Víctor, Javier, Raúl, Magno, Boris, Gonzalo, Bárbara, Gabriel, Ricardo, Tío Willy y en especial a mi hermosa novia Silvia la que me apoya y acompaña incluso hasta en los peores de los peores momentos.*

## *Dedicatoria*

*Este trabajo está dedicado a Matías, Benjamín, hermanas, sobrinos y a mis maravillosos padres y abuelos...*

# ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>2. OBJETIVOS</b>	2
2.1 Objetivo General	2
2.2 Objetivo Específico	2
<b>3. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA</b>	3
3.1 Cosechas forestales a tala rasa	3
3.2 Erosión	3
3.2.1 Erosión hídrica	4
3.2.2 Erosión eólica	7
3.2.3 La Erosión y los Bosques (cobertura vegetal)	8
3.2.4 Sedimentación	8
3.3 Radionucleidos naturales	9
3.4 Métodos para medir erosión	9
3.4.1 Análisis isotópicos	9
3.4.2 Análisis a través de parcelas de clavos	11
3.4.3 Parcelas de erosión	11
<b>4. MATERIAL Y MÉTODO</b>	12
4.1 Descripción del área de estudio	12
4.2 Antecedentes del sitio del ensayo	12
4.3 Método de muestreo	13
4.4 Técnicas de muestreo	15
4.4.1 Cuantificación de redistribución de suelo utilizando $^7\text{Be}$	15
4.4.2 Pérdidas y redistribución de suelo utilizando clavos de erosión	17
4.5 Trabajo de laboratorio	19
4.6 Análisis estadísticos	19

<b>5.</b>	<b>PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>20</b>
5.1	Comportamiento de los factores determinantes de las tasas de erosión	20
5.1.1	Precipitaciones	20
5.1.2	Densidad aparente	22
5.1.3	Pendiente	22
5.2	Redistribución de suelo, utilizando clavos de erosión	23
5.3	Variación temporal y distribución en profundidad del inventario de $^7\text{Be}$ en el área de referencia	27
5.4	Comparación de la redistribución de suelo mediante el uso de la metodología de $^7\text{Be}$ y Clavos de erosión	29
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>32</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>33</b>

## **ANEXOS**

1	Abstract and Keywords
2	Formulario de terreno
3	Gráficos de doble tendencia de mediciones efectuadas con pluviógrafos
4	Resultados de redistribución acumulada de suelo utilizando el método de clavos de erosión
5	Análisis estadístico
6	Análisis de suelo Monumento y San Germán
7	Redistribución de suelo ( $\text{t ha}^{-1}$ ) entre RD utilizando el método de $^7\text{Be}$ y clavos de erosión

## ÍNDICE DE CUADROS

		Página
Cuadro 1.	Ventajas y desventajas de los tratamientos a los desechos forestales	3
Cuadro 2.	Número del transecto y puntos de muestreo para cada transecto y parcela RD	13
Cuadro 3.	Densidades ( $\text{g cm}^{-3}$ ) del suelo en sitio de referencia, predio San Germán	22
Cuadro 4.	Pendiente de cada parcela	22
Cuadro 5.	Inventario de referencia, profundidad másica de relajación en cada fecha de medición y precipitación de cada período, para cada una de las fechas de medición	28
Cuadro 6.	Comparación de resultados obtenidos utilizando clavos de erosión y $^7\text{Be}$ , para las diferentes parcelas	30



## ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Sitio de referencia	14
Figura 2.	Pluviógrafo	14
Figura 3.	Totalizador	14
Figura 4	Precipitación diaria en el área de estudio.	20
Figura 5.	Precipitación diaria en el periodo de comparación de los resultados obtenidos aplicando los métodos de $^7\text{Be}$ y clavos de erosión.	21
Figura 6.	Redistribución neta mensual	23
Figura 7.	Redistribución neta acumulada	24
Figura 8.	Redistribución neta acumulada en el año 2006, obtenidas por Ulloa (2007)	26
Figura 9.	Decrecimiento de la actividad superficial de $^7\text{Be}$ en profundidad en el sitio de referencia, para cada una de las fechas de medición	28
Figura 10.	Decrecimiento de la actividad superficial de $^7\text{Be}$ en profundidad en el sitio de referencia, para la fecha de medición	29

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo pretende orientar sobre el distanciamiento óptimo de las rumas de desechos producto de la cosecha forestal a tala rasa y evaluar su efecto en el control de la erosión y flujo de sedimentos. Para estimar montos de redistribución de suelo se utilizó la metodología del radionucleido cosmogénico  $^7\text{Be}$ . Para estudiar la posible validación de este método se compararon los resultados con la redistribución de suelo obtenida usando clavos de erosión. También se compararon los resultados obtenidos en este estudio con los generados en el año 2006 de la investigación.

El estudio se realizó en el predio San Germán, perteneciente al Centro Experimental Forestal (CEFOR), dependiente de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Austral de Chile, durante los meses de marzo a noviembre de 2007, en un área que fue sometida a tala rasa. En el sitio se montaron cuatro parcelas con distintos distanciamientos entre rumas de desecho (parcelas RD), tres de las cuales presentaban una pendiente promedio de 29% y una de 45%. Cada una de las parcelas se identificó a través de un sistema coordinado, en el cual se definió grillas superpuestas de muestreo para  $^7\text{Be}$  y clavos de erosión. Para la aplicación del método de  $^7\text{Be}$  se recolectaron mensualmente muestras referenciales. Además se efectuó un muestreo específico en agosto de 2007 luego de eventos erosivos importantes. En el caso de los clavos de erosión, se realizaron mediciones mensuales.

Durante el período completo de observación (01 de marzo al 30 de noviembre), el análisis a través de los clavos de erosión entregó como resultado una tendencia similar entre las parcelas RD10, 15 y 30 de pendiente 29%, las cuales presentaron una sedimentación neta acumulada de 23,8, 22,2 y 25,4  $\text{t ha}^{-1}$  respectivamente. En cambio, el valor obtenido para la parcela RD18 de pendiente 45% se eleva a 40,6  $\text{t ha}^{-1}$ , siendo un 71% superior a la media (23,8  $\text{t ha}^{-1}$ ) de las otras tres parcelas.

La comparación de los montos de redistribución de suelo entre los resultados obtenidos utilizando clavos de erosión en los años 2006 y 2007, muestra diferencias significativas. Dichas diferencias se atribuyen a los distintos niveles de precipitación, ya que para el estudio del 2006 se registraron 2.517 mm, comparado con los 1.101 mm medidos el 2007 durante el mismo período.

Los resultados obtenidos para la redistribución de suelo de los eventos erosivos registrados entre el 01 de junio y el 01 de agosto de 2007 indican que, según el método del  $^7\text{Be}$ , los montos de sedimentación neta para las parcelas RD10, 15 y 30 son 3,9, 2,4 y 5,7  $\text{t ha}^{-1}$ , respectivamente. La metodología de clavos de erosión presenta valores de sedimentación para estas mismas parcelas de 12,6, 7,9 y 23,8  $\text{t ha}^{-1}$ , respectivamente. Si bien los resultados obtenidos por ambos métodos presentaron resultados de tendencia similar, el análisis estadístico detectó diferencias significativas entre los montos de redistribución entregados por las dos metodologías. Esto se atribuye principalmente a que durante el 2007 las lluvias

frecuentes registradas en el sitio de la investigación, no cumplieron las condiciones requeridas para la aplicación del método de  $^7\text{Be}$ . Estas condiciones son una lluvia de baja intensidad que deposite suficiente  $^7\text{Be}$  en forma uniforme sobre el suelo seguida de un evento erosivo importante que genere redistribución de suelo. Esta limitación ha generado la necesidad de refinar el método original de  $^7\text{Be}$  para estudiar redistribución de suelos en terrenos expuestos a precipitaciones erosivas frecuentes como en el sur de Chile, cuestión que está en desarrollo.

La investigación arrojó que el comportamiento general de la redistribución, para las condiciones en estudio, está más relacionado con el ángulo de pendiente que con la longitud de la misma. Se observó que el mejor distanciamiento entre ruma de desechos para mitigar la redistribución de suelo en pendientes de aproximadamente 29% es entre 10 y 15 m. Sin embargo, por motivos de espaciamiento en terreno y aprovechamiento de sitio para la siguiente plantación se recomendaría instalar las barreras a 15 m, lo que coincide con lo evidenciado el año 2006 de la investigación.

Palabras clave: erosión, sedimentación, tala rasa, ruma de desechos,  $^7\text{Be}$ , clavos de erosión.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las operaciones forestales pueden generar importantes riesgos de erosión y producción de sedimentos. La cosecha a tala rasa presenta el mayor potencial de erosión y sedimentación. Sus efectos se manifiestan durante las faenas, como también durante los años siguientes, hasta que el establecimiento de una nueva plantación estabiliza la zona y reduce los procesos erosivos.

En el marco de los procesos de certificación, las empresas forestales están adoptando prácticas de manejo para mitigar los impactos ambientales por las cosechas. Entre estas prácticas se puede mencionar el arrumado de los desechos de la cosecha en el sentido de las curvas de nivel y la mantención de franjas de vegetación a orillas de los cursos de agua. Existe escasa información sobre la eficiencia de las prácticas antes mencionadas en el control de la erosión y sedimentación en el país.

El presente trabajo se enmarca en el proyecto FONDECYT 1060119 “Uso de  $^7\text{Be}$  en la evaluación de eficiencia de prácticas de manejo en el control de la erosión y flujo de sedimentos a cursos de agua durante el período siguiente a la cosecha a tala rasa de plantaciones forestales” y en el proyecto DID-UACH S-200612 “Uso de  $^7\text{Be}$  para evaluar redistribución de suelo en áreas sometidas a cosecha forestal”.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

- Evaluar la eficiencia de la práctica de arrumado de residuos forestales en el control de la erosión del suelo y del flujo de sedimentos hacia cursos de agua durante el período de post-cosecha a tala rasa.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Estimar montos de redistribución de suelo mediante la utilización del radionucleido cosmogénico  $^7\text{Be}$ .
- Estudiar la posible validación del método de  $^7\text{Be}$  mediante mediciones de redistribución de suelo utilizando clavos de erosión.
- Comparar los resultados de redistribución de suelo entre rumas consecutivas obtenidos durante este trabajo con los generados durante el primer año (2006) de la investigación.
- Contribuir a mejorar el diseño de la práctica de arrumado de residuos forestales.

### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Cosechas forestales a tala rasa

Las plantaciones forestales culminan su rotación al momento de estar en un punto, que determinado con algún criterio económico o biológico, deben ser cortadas. El sistema de cosecha más usado es de tala rasa, que se define como un método de corta en que se sacan todos los árboles para dar paso a la siguiente regeneración (plantación), cuyo objetivo final es obtener rodales uniformes (Daniel *et al.*, 1982).

La legislación actual no establece superficie límite para esta corta en terrenos con pendientes bajo 30%. Sólo en el rango entre 30 y 45% se establece que la corta no supere las 20 hectáreas, dejando al menos 100 m de vegetación al borde de los cursos de agua. Sobre 45% de pendiente no se puede realizar la cosecha final utilizando este sistema (CONAF 1981).

Las operaciones de cosecha generan gran cantidad de desechos forestales (Gayoso y Acuña, 1999). Estos desechos requieren de organización para:

- Otorgar espacio para las nuevas plantas a establecer.
- Facilitar la labor de plantación y posteriores actividades silvícolas, y
- Disminuir su peligro como combustible.

Los principales tratamientos que se le dan a los desechos forestales consisten en el ordenamiento de los mismos en el sentido de las curvas de nivel y la quema controlada de éstos. Ambos tratamientos presentan una serie de ventajas y desventajas. Según Gayoso y Acuña (1999), las más importantes respecto al ordenamiento de desechos se resumen en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de los tratamientos a los desechos forestales.

Ventajas	Desventajas
Conserva las propiedades del suelo	Generalmente tiene un costo mayor que la quema controlada
Permite el reciclaje de residuos	Bajo rendimiento de la faena
Evita la erosión	No se disminuye la carga de combustible
Favorece la biodiversidad	

#### 3.2 Erosión

La erosión es la acción de dispersión y arrastre de material del suelo. El proceso puede ser natural o acelerado por la actividad humana. Según Schlatter *et al.*, (2003) la erosión puede ser lenta o muy rápida, dependiendo de las condiciones

geomorfológicas y climáticas (=erosividad) y puede ser favorecida por una menor estabilidad (cohesión) del suelo (=erodabilidad).

La erosión natural corresponde al desgaste geológico que experimenta la superficie terrestre y que modela la geomorfología. La erosión acelerada es la consecuencia de la actividad humana como son: barbecho, pastoreo y otras formas de disminución de la cobertura vegetal, que exponen el suelo a la energía erosiva del medio.

A la erosión causada por el agua se le denomina erosión hídrica, y la causada por el viento es llamada erosión eólica. Esta última es de gran importancia en las regiones de Aysén y Magallanes, debido a los fuertes vientos que ahí se suceden y principal responsable de la formación y avance de dunas.

### 3.2.1 Erosión hídrica

En toda la superficie terrestre el suelo está sujeto a la erosión por acción del agua. Esto sucede cuando éste no está provisto de una cubierta vegetal que lo proteja durante las lluvias. Estas últimas pueden ser incluso lluvias moderadas, las cuales remueven el suelo desnudo, iniciándose así los procesos de denudación o de desecación que pueden originar graves daños si no se implementan medidas protectoras. Cuando de un terreno en declive se quita total o parcialmente la cubierta vegetal, el agua de lluvia corre sobre el suelo más rápido y más caudalosamente arrastrando partículas o pequeños agregados de suelo.

Existen dos formas principales de erosión hídrica según el mecanismo. Estas son: el agua ataca al suelo en su parte superficial apartando los elementos terrosos mientras son arrastrados; y un ataque del agua al suelo en su conjunto, es decir, al perfil, donde toda la masa es susceptible a ser erosionada (López y Blanco, 1976).

La primera tiene un mecanismo que abarca dos fases: formación de elementos susceptibles a ser arrastrados por el agua y arrastre y transporte de estos elementos, donde intervienen las precipitaciones atmosféricas y luego la acción del escurrimiento (Fontainer, 1975).

Las principales formas en la que el agua ataca en forma superficial son las erosiones de manto, surcos y cárcavas. (Schlatter *et al.*, 2003).

- a) Erosión de Manto: Es el desgaste superficial más o menos uniforme de un suelo, sin la formación de surcos pronunciados. Después de producida es poco identificable, comparada con otras formas, y puede ser medida con controles durante el proceso. Se presenta en pendientes de 1 – 2%, se intensifica a medida que la pendiente aumenta.
- b) Erosión de Surcos: Es el desgaste del suelo a través de pequeños, pero definidos canalículos, donde se concentra el escurrimiento de agua. Estos pueden ser fácilmente nivelados por arado.

- c) Erosión de Cárcavas: Es el desgaste pronunciado y concentrado del suelo por agua, formando cortes, debido a pequeñas cascadas en la línea de escurrimiento. Estas se forman en vías naturales de evacuación de agua, en sucros de arado, en senderos de animales, en huellas de vehículos, entre melgas de cultivos y al pie de terrazas hechas por el hombre. Estos no se pueden nivelar con un simple arado.

Ayres (1960), menciona una cuarta erosión causada por el agua que ataca al suelo en su parte superficial, la llamada erosión fluvial que es la erosión que provocan los ríos y cauces tanto en el desgaste de sus orillas como en el fondo, cuando hay pendientes excesivas y crecidas en el volumen de las corrientes.

En la segunda forma el elemento clave para el movimiento sigue siendo el agua, pero son diferentes mecanismos los que generan el arrastre, entre los cuales se encuentran: socavación del suelo en su parte inferior; saturación de una capa del suelo por encima de una capa impermeable; saturación del suelo por el agua y efecto de la gravedad, siendo este último el de menor importancia (Fontainer, 1975).

Las tasas de erosión son determinadas por una serie de factores: la lluvia, la escorrentía, el suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la presencia o ausencia de medidas de conservación. Existen tres aspectos en que se pueden acoger estos y otros factores relacionados con ellos; energía, resistencia y protección (Morgan, 1996).

La lluvia se relaciona profundamente con la erosión del suelo y está determinada entre otras cosas por la cantidad, intensidad y duración. El mayor efecto es producido por las gotas de agua que golpean el suelo, no obstante la mayor parte de la energía de las gotas de lluvias provoca el desprendimiento de partículas. De esta manera el más poderoso agente erosivo es la concentración de la escorrentía en regueros (Morgan, 1996).

Según Morgan (1996) la erosión se relaciona con dos tipos de lluvia; la tormenta intensa y de corta duración que supera la cantidad de infiltración del terreno y la tormenta de larga duración y baja intensidad que satura el suelo. También la respuesta de suelo a la lluvia puede estar determinada por condiciones meteorológicas previas. Así durante las primeras lluvias caídas en terreno seco, independiente de la cantidad, la escorrentía es escasa por la mayor capacidad de infiltración del terreno.

La escorrentía es el más poderoso agente erosivo, a través de regueros, de esta manera puede ser un flujo superficial o un flujo en regueros o arroyuelos. Corresponde a un porcentaje de la precipitación, pudiendo el resto evaporarse o infiltrarse, y donde la infiltración del suelo regula la repartición entre el agua que penetra al interior y el agua que queda detenida o bien escurre por la superficie (López y Blanco, 1976). Según Morgan (1996) el flujo superficial se produce en las laderas durante una tormenta cuando se supera la capacidad de almacenaje en las depresiones de la superficie y cuando, ya sea por lluvias prolongadas o intensidad



superior a la de infiltración de suelo, se supera su capacidad de retención, el flujo se ve interrumpido por grandes piedras, guijarros y la cobertura vegetal. Para el desprendimiento de las partículas del suelo por el flujo superficial, un factor relevante es la velocidad de éste, que debe alcanzar un valor umbral antes de que se inicie la erosión, básicamente el desprendimiento de las partículas de la masa del suelo se produce cuando las fuerzas ejercidas por el flujo son superiores a las que mantienen la partícula unida al resto (Morgan, 1996).

Otro factor de los procesos erosivos es el suelo, el cual tiene estrecha relación con el movimiento del agua sobre su superficie. El suelo puede almacenar la lluvia que cae en pequeñas depresiones u hondonadas de la superficie o puede infiltrarse contribuyendo al contenido de humedad en el suelo, o por percolación al recargar los acuíferos. Cuando el suelo es incapaz de almacenar más agua el exceso se desplaza lateralmente a favor de la pendiente o contribuye a la escorrentía superficial, provocando erosión (Morgan, 1996).

La escorrentía superficial es controlada preponderantemente por la velocidad con que el agua pasa al interior del suelo, esto es la velocidad de infiltración (Morgan, 1996). Según FAO (1967) la velocidad de infiltración de un suelo seco es muy alta en el inicio, disminuyendo rápidamente a medida que el suelo se humedece, hasta alcanzar una velocidad de equilibrio. Las características físicas más importantes que de una u otra forma participan en la erosión hídrica son la textura y estructura.

Los espacios porosos en el suelo son variables, siendo mayores en suelos arenosos, luego suelos franco hasta los arcillosos (Morgan, 1996). López y Blanco (1968), señalan que un tipo medio de textura (franco) es más favorable para el control de la erosión, esto originará una porosidad capaz de facilitar la infiltración y por otro lado será posible la formación de agregados. Además estos suelos, que presentan buenas condiciones de las arenas y arcillas, otorgan las mejores condiciones para el crecimiento de la vegetación (Donoso, 1981).

La disgregación aumenta con el aumento del tamaño de las partículas de suelo, mientras que el transporte aumenta al disminuir este tamaño. De aquí resulta que el desprendimiento de las partículas de arcillas tengan mayor dificultad que los granos de arenas, no obstante son más fáciles de ser transportadas (FAO, 1967). Para López y Blanco (1968) un suelo de textura arenosa, al tener gran porosidad, mientras las lluvias no alcancen cierta intensidad, absorberá toda el agua que perciba y por lo tanto, en ausencia de escorrentía no habrá erosión. Por otro lado suelos arcillosos, frente a lluvias normales, el pequeño grado de porosidad, harán que gran parte de las aguas no se filtren, produciendo escorrentía que pueden ser causa de erosiones importantes.

La pendiente es un factor importantísimo para que se produzca erosión según López y Blanco (1968), ya que en zonas llanas prácticamente no existe erosión. Cuando el terreno es más o menos horizontal, existe un desplazamiento de las partículas de tierra en todos los sentidos, existiendo así una compensación mutua. En pendientes superiores a tres por ciento la película superficial sufre erosión, aumentando con el

aumento de la pendiente, pudiendo llegar a ser el factor más importante en terrenos cultivados, con pendientes mayores de 10 por ciento (FAO, 1967).

La pendiente de los terrenos influye de distintos modos sobre la erosión, entre los cuales se encuentra mayor velocidad del agua de escurrimiento lo que hace que sea mayor el volumen de suelo arrancado de su sitio y llevado a otro lugar, a medida que la inclinación del terreno crece el agua adquiere mayor velocidad por que los surcos y depresiones existentes en él tienen menor capacidad de retención. La película superficial de materia fina que se acumula en el suelo durante un aguacero intenso y que contribuye a protegerle de la denudación es desprendida y arrastrada en los terrenos con pendientes. Esto deja al descubierto componentes fácilmente separables del suelo y que facilitan la erosión de éste (FAO, 1967).

Morgan (1996) cita una serie de trabajos que muestran que la erosión aumenta al hacerlo la pendiente, sugiriendo que para erosiones por salpicadura y flujo superficial, las pérdidas de suelo al principio aumentan rápidamente al pasar de pendiente de suave a moderada, hasta alcanzar un máximo para pendientes de 8 a 10° y, después disminuye aunque aumente la pendiente.

La longitud de la pendiente también tiene influencia sobre la erosión hídrica, en general ésta tiende a aumentar a mayor largo de pendiente, debido al mayor volumen de agua que suele acumularse y el aumento considerable de la velocidad del escurrimiento. Esto ocurre por los arrastres de suelo en las partes más altas que se producen, primero, por flujo superficial y, posteriormente, por flujo en regueros (Morgan, 1996).

La tierra producto de la erosión, cualquiera sea su causa, se hace gradualmente inhabitable, y es necesario trasladarse a otras tierras mas productivas, sin embargo cuando ya no hay tierras fértiles hay que adaptarse a suelos menos productivos por causas de la erosión. Esto no ocurriría si los que aprovechan la tierra utilizaran el conocimiento científico de la conservación del suelo y agua (FAO, 1967).

Peña *et al.*, (1993) estimaron las pérdidas de suelo en diferentes predios de la cuenca del río Bío-Bío, para diferentes técnicas de cosecha en bosques de *Pinus radiata*, registrando pérdidas de 3,12 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> del suelo en tratamientos con quemas de los residuos después de las cosechas, reduciéndose a 0,84 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> al eliminar esta práctica. No obstante, no se han encontrado estudios que relacionen las mejores prácticas de manejo de residuos con la erosión del suelo.

Un mayor énfasis al factor cobertura vegetal como factor que inciden en la tasa de erosión se da en el punto 3.2.3.

### 3.2.2 Erosión eólica

El movimiento de las partículas del suelo es producido por la fuerza que ejerce el viento contra la superficie del terreno. Si las partículas se encuentran sueltas o no son muy pesadas, el viento podrá levantarlas, y con ello se iniciará el movimiento del

suelo. Los factores que la determinan son: el tamaño y la densidad de las partículas del suelo que pueden desprenderse (FAO 1961).

Este tipo de erosión puede darse en cualquier lugar donde las condiciones del suelo, la vegetación o del clima sean favorables para este proceso. Esto ocurrirá donde se den los siguientes factores:

- El suelo aparece suelto, seco y finalmente dividido en cierto grado.
- La superficie del suelo es más bien lisa, con poca o escasa cubierta vegetal.
- El campo es suficientemente extenso y;
- El viento es lo suficientemente fuerte para iniciar el movimiento del suelo.

### 3.2.3 La Erosión y los Bosques (cobertura vegetal)

Los bosques presentan una protección extraordinaria del suelo, siendo una defensa contra la erosión, el embancamiento sobre las fuentes de agua, manantiales, hoyas hidrográficas y lagos (Duran, 1970). Protegen al suelo de la percusión de las gotas de lluvia, aumento del poder de infiltración del suelo y disminución del agua de escorrentía, reducen la velocidad de escurrimiento por obstáculos como troncos de árboles y tallos de arbustos y mayor consistencia del suelo por entrelazamiento de raíces. De esto se deduce que una cubierta vegetal puede reducir el fenómeno de erosión al mínimo (López y Blanco, 1968; Morgan, 1996). Ibarra *et al.*, (s.f.), confirma que en terrenos de aptitud forestal, con una misma condición edafoclimática y topográfica, la cubierta arbórea representa la forma más eficiente de protección del suelo.

En un estudio realizado por Iroumé *et al.*, (1989) se evidenció la importancia de la cobertura vegetal sobre las pérdidas de suelo. Estas alcanzan a  $1,6 \text{ t ha}^{-1}$  para suelos sin cubierta vegetal, luego de un año de una tala rasa y de ser quemados sus desechos, mientras que las pérdidas se reducen a  $0,1 \text{ t ha}^{-1}$  en parcelas bajo vegetación arbustiva, regenerada naturalmente en un área explotada a tala rasa dos años antes y en parcelas bajo plantación de *Pinus radiata* (D. Don) de seis años el arrastre disminuye a  $0,08 \text{ t ha}^{-1}$ . Se estima una pérdida del orden de un 45% del total erosionado durante el primer año de ocurrida la tala rasa durante una rotación de 20 a 25 años, pudiendo ser mayor ya que se registró un período en que sólo cayó un 28% de la precipitación total.

### 3.2.4 Sedimentación

El suelo desplazado de su localidad original por la erosión es depositado siempre en otro lugar. Puede ser depositado cerca del lugar de origen, puede hacer el recorrido total y acabar depositándose en el mar o, puede sedimentarse en cualquier punto entre estos dos extremos (FAO 1967).

### 3.3 Radionucleidos naturales

Nucleidos radiactivos son todos aquellos que emiten espontáneamente radiación. Como consecuencia del proceso de desintegración nuclear, los átomos de los elementos radiactivos pueden transformarse en otros. En muchos casos, puede ocurrir que un núcleo se transforme en otro que a su vez es radiactivo, produciéndose de esta manera una cadena de desintegración hasta llegar a un elemento estable. La velocidad de desintegración de cada nucleido radiactivo está caracterizada por una constante, llamada constante de desintegración, cuyo valor es invariable respecto de cualquier transformación química (Bosch, 1965).

### 3.4 Métodos para medir erosión

#### 3.4.1 Análisis isotópicos

El uso de radionucleidos como  $^{137}\text{Cs}$  ( $t_{1/2} = 30,2$  años) y  $^{210}\text{Pb}$  ( $t_{1/2} = 22,2$  años), para determinar montos de redistribución de suelo y distribución espacial, es un avance importante. Sin embargo, debido a sus largas vidas medias se propone explorar el uso de radionucleidos complementarios que sirvan para estimar erosión en eventos individuales o períodos cortos de tiempo. El  $^7\text{Be}$  tiene las características que permiten cumplir estos requerimientos (Walling, *et al.*, 1999).

El  $^7\text{Be}$  ( $t_{1/2} = 53,3$  d;  $E_{\gamma} = 477,6$  keV) es producido naturalmente en la atmósfera superior por fragmentación de núcleos de nitrógeno y oxígeno por radiación cósmica. La reacción nuclear produce  $\text{BeO}$  o  $\text{Be}(\text{OH})_2$ , que difunden a través de la atmósfera hasta que son unidos a un aerosol atmosférico. La producción de  $^7\text{Be}$  depende de los flujos de rayos cósmicos los cuales varían con la latitud, altitud, y actividad solar. La subsecuente depositación en la superficie de la tierra ocurre como precipitación radiactiva, tanto húmeda como seca. Se ha demostrado, que para  $^7\text{Be}$  la precipitación radiactiva está principalmente asociada a la lluvia (Wallbrink *et al.*, 2002). El  $^7\text{Be}$  que se deposita sobre el suelo y la vegetación, es secuestrado rápidamente por las superficies de intercambio (Kaste *et al.*, 2002). La mayor parte del  $^7\text{Be}$  precipitado que toca el suelo es rápida y fuertemente fijada en el estrato superficial por la alta adsorción a los coloides del suelo. Su potencial ya se ha usado como trazador de sedimentos en sistemas marinos y lacustres los cuales han sido muy efectivos. En este caso, la corta vida media del  $^7\text{Be}$  ha otorgado un medio de identificación de sedimentos que recientemente han estado en contacto con aportes por precipitación radiactiva (Blake *et al.*, 1999). Su corta vida media sumada a su origen cosmogénico, constituyen una ventaja para su uso en estudios de la redistribución del suelo en el corto plazo (Schuller *et al.*, 2006).

Los principios involucrados en el uso de  $^7\text{Be}$  para documentar tasas y patrones de redistribución de suelo son esencialmente los mismos que los empleados al utilizar  $^{137}\text{Cs}$ . Esto es, que el inventario de  $^7\text{Be}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) en un punto de muestreo puede ser comparado con el inventario de un sitio de referencia. Así las desviaciones podrían reflejar la redistribución de sedimentos. Reducciones del inventario de  $^7\text{Be}$  con respecto al inventario de referencia podrían proveer evidencia de erosión. En áreas

de depositación deberían medirse incrementos en el inventario comparando al de referencia. El aumento o disminución del inventario de  $^7\text{Be}$ , respecto al valor de referencia, puede entregar una base para estimaciones de magnitud de las tasas de depositación y erosión involucrados, respectivamente.

Para estimar tasas de erosión y depositación es necesario considerar la distribución en profundidad del radionucleido. La mayor parte del  $^7\text{Be}$  se encuentra a unos pocos mm de la superficie del suelo, y la declinación de la concentración en profundidad es de forma exponencial (Walling, *et al.*, 1999).

Schuller *et al.*, (2006), señalan que el método para estimar redistribución de suelo, mediante el uso del  $^7\text{Be}$ , implica varias hipótesis:

- El depósito de  $^7\text{Be}$  desde la atmósfera es uniforme en un área reducida.
- El  $^7\text{Be}$  se fija rápidamente a las partículas del suelo superficial.
- Durante períodos de intensa precipitación  $^7\text{Be}$  se moviliza por erosión de partículas de suelo.

La aproximación tiene ciertas limitaciones, como la necesidad de asegurar que el inventario sea uniforme en el sitio de estudio inmediatamente antes del período de lluvias intensas investigadas y la necesidad de contar con un equipo de espectrometría gamma (Schuller *et al.*, 2006).

La información obtenida a través de mediciones de  $^7\text{Be}$  en los puntos de una grilla del terreno a ser estudiado permite cuantificar:

- Distribución espacial de la erosión y sedimentación en el sitio estudiado,
- Erosión media ( $\text{kg m}^{-2}$ ) y fracción del área total afectada por este proceso (%)
- Sedimentación media ( $\text{kg m}^{-2}$ ) y fracción del área total afectada por este proceso (%)
- Erosión o sedimentación neta ( $\text{kg m}^{-2}$ ) y
- Fracción de pérdida de sedimentos (%) (o proporción de sedimentos movilizados por erosión fuera del área estudiada) (Schuller *et al.*, 2004).

Las ventajas del uso de  $^7\text{Be}$  en cuantificación de la redistribución de suelo incluyen la posibilidad de desarrollar investigaciones retrospectivas luego del período de lluvias intensas, la falta de una necesidad por instalaciones de campo o la introducción de condiciones no representativas y la posibilidad de generar información distribuida espacialmente sobre las cantidades de erosión y sedimentación y con esto documentar la redistribución del suelo en el sitio de estudio, y la pérdida neta de suelo. Igualmente, una ventaja importante sobre el uso de los clavos de erosión es que el área del suelo analizada mediante la técnica de  $^7\text{Be}$  es muy superior a la analizada con clavos de erosión. Así es menos probable que haya influencia de anomalías en baja escala y/o la variabilidad asociada con la redistribución del suelo (Schuller *et al.*, 2006).

Blake *et al.*, (1999), apuntan que en el caso de la forma de los aportes por lluvia, pueden estos ser asumidos como relacionados a la profundidad de influencia de la precipitación, y ésta es común que sea relativamente constante para áreas pequeñas. En último caso la vida media relativamente corta del  $^7\text{Be}$ , puede asegurar que cualquier variabilidad espacial preexistente, es inherente a eventos erosivos pasados y puede ser compensado por decaimiento radiactivo, si se prevee un intervalo de tiempo suficiente entre eventos erosivos, aproximadamente cinco meses, es decir, tres vidas medias del radionucleido (Schuller *et al.*, 2006).

#### 3.4.2 *Análisis a través de parcelas de clavos*

Es uno de los métodos experimentales para el estudio de la erosión. El método de los clavos de erosión es una metodología experimental donde el lugar de cada clavo se identifica a través de un sistema de coordenadas que permite observar el comportamiento del suelo en cada punto de control a través del tiempo. Mediante este método se puede cuantificar la erosión y, además, se cuantifica la entrada de suelo, es decir, la sedimentación que se produce en el lugar. La desventaja del método es la incidencia de la microtopografía, la cual influye en cada punto de muestreo.

#### 3.4.3 *Parcelas de erosión*

Según Peralta (1976), las parcelas de erosión constituyen el único sistema que permite medir con exactitud inobjetable, los montos de pérdida de suelos en un área determinada. Además se puede agregar que en número adecuado pueden representar acertadamente factores como pendiente, tipo de suelo, cubierta vegetal, prácticas culturales y otros.

Básicamente, el sistema considera una porción de terreno como cuenca hidrológica independiente del resto del sector. Esto se verifica limitando el área elegida mediante distintos materiales y medios, asegurando así que el escurrimiento tenga su origen dentro del perímetro fijado (López y Blanco, 1976).

Las parcelas de escurrimientos involucran la captación del caudal líquido y sólido, pero son difíciles de implementar por costos y tecnología, además no permite estudiar la distribución espacial de los fenómenos erosivos y de sedimentación.

## **4. MATERIAL Y MÉTODO**

### **4.1 Descripción del área de estudio**

El estudio se realizó en el predio San Germán, perteneciente al Centro Experimental Forestal (CEFOR), dependiente de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Austral de Chile.

Está ubicado en la provincia y comuna de Valdivia, sector Cayumapu, a 15 km de la ciudad de Valdivia, 39° 45` 13``S y 73° 10` 30``W.

### **4.2 Antecedentes del sitio del ensayo**

El clima de la región corresponde a un clima mediterráneo húmedo, caracterizado por precipitaciones que alcanzan promedios anuales de 2.500 mm que fluctúan entre 1.800 y 3.100 mm, y donde el 75% se concentra entre los meses de abril y septiembre (Di Castri y Hajek, 1976).

Los vientos que predominan en la zona son los del norte y oeste. Estos son generalmente los causantes de las precipitaciones, como también daños de volteo y desecamiento a vegetales (Huber, 1970).

Según la clasificación climática de Koeppen, el área se encuentra dentro del clima de costa occidental, donde se presentan precipitaciones durante todo el año existiendo un descenso de ellas en los meses estivales. La temperatura media anual es de 11,9°C, siendo enero el mes más cálido con una temperatura media 17°C y julio el mes más frío con 7,7°C (Fuenzalida, 1965).

La topografía se caracteriza por la presencia de cerros y lomajes cortados por quebradas en algunos casos poseen fuertes pendientes entre 30 y 50%, que limitan la accesibilidad. Se sitúa dentro de la unidad de relieve denominada Cordillera de la Costa que, topográficamente es una cadena montañosa baja en alturas entre 100 y 280 m s.n.m. en este sector.

Los suelos del predio pertenecen a la serie Los Ulmos, la que se caracteriza por presentar suelos profundos, rojos arcillosos, originados a partir de cenizas volcánicas antiguas depositadas sobre el complejo metamórfico de la costa. Son suelos bien drenados, que se encuentran ubicados en la Cordillera de la Costa de textura superficial franco arcillosa y color pardo rojizo oscuro en matiz 5YR, y textura arcillosa y color rojo amarillento en matiz 5YR en profundidad, bien estructurado (IREN-CORFO-UACH, 1978).

### 4.3 Método de muestreo

Se identificó un área sometida a cosecha a tala rasa, en la que se construyeron cuatro parcelas RD. Éstas se demarcaron por rumbas de desechos forestales construidas en sentido de las curvas de nivel con separaciones aproximadas de 10, 15 y 30 m (parcelas RD10, RD15 y RD30 respectivamente) con una pendiente promedio de 30% y una parcela de 18 m (RD18) con una pendiente de 45%. En cada parcela se definieron grillas superpuestas de muestreo de  $^7\text{Be}$  y de clavos de erosión. El ancho de las parcelas RD es en promedio de 7,5 m, la separación lateral promedio entre puntos de muestreos es de aproximadamente 3,4 m.

Cada punto se identificó a través de un sistema coordinado, con una separación media longitudinal de 1,67 m para todas las parcelas. En cada punto de la grilla para clavos de erosión, se instalaron tres clavos en un área de 10 cm de diámetro.

Las grillas consideraron dos transectos. Dependiendo de la longitud de la parcela, se distribuyeron de la siguiente forma, Cuadro 2.

Cuadro 2. Número del transecto y puntos de muestreo para cada transecto y parcela RD.

Transectos	RD10	RD15	RD30	RD18
1	7	10	19	10
2	7	10	19	10
TOTAL	14	20	38	20

Los puntos de muestreo de  $^7\text{Be}$  se ubicaron a una distancia no mayor de 0,5 m de los clavos de erosión en todas las parcelas, para no causar perturbación en los puntos de postura de los clavos al recolectar las muestras para análisis de  $^7\text{Be}$ . Por cada punto de muestreo de  $^7\text{Be}$  se recolectaron tres cilindros de 10,6 cm de diámetro interno y 4 cm de longitud.

En un sitio plano, sin cubierta vegetal, adyacente a las parcelas, situado en altura, el cual no presenta evidencia de erosión ni sedimentación, y con condiciones edáficas y climáticas similares al área estudiada, se midió periódicamente la distribución vertical del inventario de  $^7\text{Be}$  y el inventario de referencia (Figura1). Este lugar se dividió en cuatro sub-zonas, en ellas se toman ocho muestras referenciales mensualmente, la primera medición correspondió al dos de abril del año 2007.





Figura 1. Sitio de referencia

En el área de estudio se instaló un pluviógrafo, con una resolución de 0,2 mm, para cuantificar mediante registro continuo el aporte de precipitación, y además se instaló un totalizador para registro del depósito de  $^7\text{Be}$  (Figura 2 y Figura 3).



Figura 2. Pluviógrafo



Figura 3. Totalizador

Para el método de clavos de erosión se realizaron mediciones periódicas de aproximadamente 30 d (formulario tipo en Anexo 2). Estas fueron entre los meses de marzo a noviembre. En cada ocasión se registró la extensión expuesta de cada clavo.

Para  ${}^7\text{Be}$  se realizó una recolección de muestras en el sitio de estudio, inmediatamente después de eventos erosivos importantes precedidos por un período sin lluvias erosivas. Igualmente, en esta fecha se realizó una medición con clavos de erosión y se recolectaron muestras referenciales. También se realizó un análisis granulométrico, físico y químico del sector para comparar las características de suelo con el estudio anterior. Para la determinación de carbono orgánico, se utilizó la metodología de combustión húmeda y determinación colorimétrica del cromato reducido. Según Grez *et al.*, 2002, el método consiste en combustión húmeda de la materia orgánica con una mezcla de dicromato y ácido sulfúrico. Posteriormente, después de la reacción se mide colorimétricamente el cromato reducido.

#### 4.4 Técnicas de muestreo

##### 4.4.1 Cuantificación de redistribución de suelo utilizando ${}^7\text{Be}$

El método de estimación de redistribución de suelo utilizando  ${}^7\text{Be}$  es descrito por Blake *et al.*, (1999), Walling *et al.*, (1999) y Schuller *et al.*, (2006). La concentración másica de  ${}^7\text{Be}$  en el suelo decrece exponencialmente en profundidad. Esto se describe por la siguiente función exponencial:

$$C(x) = C(0)e^{\frac{-x}{h_0}} \quad [1]$$

Donde:

$x$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ), es la profundidad másica, medida desde la superficie del suelo, siendo esta variable positiva hacia abajo.

$C(x)$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ), es la concentración másica de  ${}^7\text{Be}$ , a la profundidad másica  $x$ .

$C(0)$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ), es la concentración másica de  ${}^7\text{Be}$ , en la superficie del suelo.

$h_0$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ), es la profundidad másica de relajación, que describe la forma de la distribución inicial en profundidad de  ${}^7\text{Be}$ , para un perfil de suelo inalterado.

El inventario de referencia de  ${}^7\text{Be}$ ,  $A_{ref}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ), es la actividad total de  ${}^7\text{Be}$  por unidad de área en un sitio estable y no afectado por erosión ni sedimentación. Se expresa de la siguiente manera:

$$A_{ref} = \int_0^{\infty} C(x)dx = C(0)h_0 \quad [2]$$

De las fórmulas [1] y [2] se infiere que el inventario de  ${}^7\text{Be}$ ,  $A = A(x)$ , ( $\text{Bq m}^{-2}$ ), bajo la profundidad  $x$ ,  $A$  puede expresarse como:

$$A = A(x) = \int_x^{\infty} C(x) dx = C(0)h_0 e^{-\frac{x}{h_0}} = A_{ref} e^{-\frac{x}{h_0}} \quad [3]$$

Si  $x = h_0$ :

$$A(h_0) = A_{ref} e^{-\frac{h_0}{h_0}} = 0,368 A_{ref} \quad [4]$$

Es decir, bajo la profundidad  $h_0$  se encuentra el 37% del  $^7\text{Be}$  total. Por lo tanto, entre la superficie y  $h_0$ , se encuentra concentrado el 63% del inventario total de  $^7\text{Be}$ .

Asumiendo que la erosión remueve un delgado estrato superficial del suelo, el inventario de  $^7\text{Be}$  restante en un punto erosionado,  $A$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ), debe ser menor que en el punto de referencia,  $A_{ref}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ). Ahora si,  $R$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ), es la profundidad másica del suelo erosionado, o bien la cantidad de suelo erosionado, esta puede calcularse a partir de la ecuación [3], sustituyendo  $x = R$ :

$$R = h_0 \text{Ln} \left[ \frac{A_{ref}}{A} \right] \quad [5]$$

Cuando el inventario de  $^7\text{Be}$  en el punto de muestreo es mayor que el inventario de referencia, se asume un depósito de material,  $R'$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ), el cual se calcula de la siguiente forma:

$$R' = \frac{[A - A_{ref}]}{C_d} \quad [6]$$

Siendo  $C_d$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ), la concentración de  $^7\text{Be}$  en los sedimentos depositados.  $C_d$  se asume como la concentración media de los sedimentos movilizados desde cada punto arriba,  $C_e$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ), ponderado por la erosión en cada punto del área tributaria,  $S$  ( $\text{m}^2$ ), pendiente arriba:

$$C_d = \frac{\int_0^{\infty} C_e R ds}{\int_0^{\infty} R ds} \quad [7]$$

La concentración de  $^7\text{Be}$  del sedimento erosionado desde un punto en particular,  $C_e$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ), se puede estimar desde la función de distribución inicial en profundidad, y el monto de erosión en el punto, como sigue:

$$C_e = \frac{\left[ A_{ref} * \left( 1 - e^{\frac{-R}{h_0}} \right) \right]}{R} \quad [8]$$

#### 4.4.2 Pérdidas y redistribución de suelo utilizando clavos de erosión

Para cuantificar la cantidad de suelo erosionado o sedimentado en cada punto de muestreo utilizando clavos de erosión, se determina la variación de altura expuesta de éstos,  $\Delta h$  (mm), entre períodos de medición. Al valor inicial de 100 mm se le resta la altura obtenida en la primera medición. Si  $\Delta h < 0$ , el punto estuvo expuesto a erosión y si  $\Delta h > 0$ , el punto estuvo sometido a sedimentación. De la misma forma se realiza el cálculo para los períodos siguientes.

Para cada uno de los puntos analizados se determinó su ubicación espacial en terreno, mediante sistema de coordenadas, para posteriormente obtener la distribución espacial de la redistribución de suelo.

La densidad aparente,  $D_a$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ), del suelo superficial en cada punto se obtuvo mediante un promedio ponderado, de las  $D_a$  de las muestras colectadas para determinar  $^7\text{Be}$ , según las distancias entre estos puntos y los puntos muestrales de  $^7\text{Be}$  próximos. Entonces para obtener  $R_e$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ), la fórmula utilizada fue la siguiente:

$$R = \frac{\Delta h}{1000} * D_a \quad [9]$$

Donde:

$\Delta h$  (mm), es la diferencia de altura expuesta de los clavos entre períodos de medición consecutivos.

$D_a$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ), es la densidad aparente en la capa superficial de suelo.

Para determinar la redistribución de suelo, erosión media, sedimentación media y erosión neta, las formulas utilizadas serán:

$$R_{med} = \frac{\sum (R_1 + R_2 + \dots + R_n)}{n} \quad [10]$$

Donde:

$R_{med}$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ), es la erosión media.

$n$  es el número de puntos erosionados.

$R_1, R_2, \dots, R_n$  son los montos de erosión en cada punto afecto a pérdida de suelo.

De misma forma se calculó la sedimentación media,  $R'_{med}$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ), utilizando la fórmula:

$$R'_{med} = \frac{\sum (R'_1 + R'_2 + \dots + R'_n)}{n'} \quad [11]$$

Donde:

$R'_1, R'_2, \dots, R'_n$  son los montos de sedimentación en cada punto afecto a depositación de suelo.

$n'$  es el número de puntos sedimentados.

La fracción del área total afectada por erosión  $f_R$ , y análogamente la fracción de área sedimentada  $f_{R'}$  del área total, se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$f_R = \frac{(a_1 + a_2 + \dots + a_n)}{A} \quad [12]$$

$$f_{R'} = \frac{(a'_1 + a'_2 + \dots + a'_n)}{A} \quad [13]$$

Donde:

$a_1, a_2, \dots, a_n$  ( $\text{m}^2$ ) son las áreas de influencia de cada uno de los puntos de erosión.

$a'_1, a'_2, \dots, a'_n$  ( $\text{m}^2$ ) son las áreas de influencia de cada uno de los puntos de sedimentación.

$A$  ( $\text{m}^2$ ) es el área total de la unidad de muestreo.

La erosión neta,  $R_{net}$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ), se calculó según la expresión:

$$R_{net} = (R_{med} f_R) - (R'_{med} f_{R'}) \quad [14]$$

Si  $R_{net} > 0$ , implica que el área estudiada está afectada a erosión neta ( $\text{kg m}^{-2}$ ). Ahora si  $R_{net} < 0$ , significa que el área está afectada por sedimentación neta.

La fracción de sedimentos movilizados  $f_{mov}$ , se obtuvo con la fórmula:

$$f_{mov} = \frac{(R_{net})}{(R_{med} * f_R)} \quad [15]$$

#### 4.5 Trabajo de laboratorio

Los cilindros de suelo colectados en las grillas del área de referencia fueron seccionados en el laboratorio en incrementos de 2 mm de espesor. Cada uno de los incrementos de suelo fueron secados a temperatura ambiente y posteriormente a 105°C, triturados (Molino Retsch S 1000) y homogenizados con mezclador Turbula Mixer T2 F durante 25 minutos para formar muestras compuestas a ser sometidas a espectrometría gamma. Así se determinó la distribución vertical de la concentración másica de  $^7\text{Be}$  y de la  $D_a$  del suelo en el sitio de referencia.

Con el promedio de las concentraciones de  $^7\text{Be}$  medido en cada sección de suelo se determinó la profundidad másica de relajación  $h_0 \pm \Delta h_0$  y el inventario de referencia  $A_{ref} \pm \Delta A_{ref}$ . Con ello se determinó además la profundidad (cm) y profundidad másica ( $\text{kg m}^{-2}$ ) de penetración del  $^7\text{Be}$ . Ello con el objeto de estimar la profundidad de corte de las muestras procedentes de las parcelas, de forma de desechar tanto en la zona de pérdida como en la de acumulación de sedimentos la capa de suelo en que la concentración de  $^7\text{Be}$  está bajo el límite de detección, para no reducir innecesariamente la concentración de  $^7\text{Be}$  en la muestra a ser sometida a análisis gama. La determinación de la profundidad de penetración del  $^7\text{Be}$  en las áreas afectas a sedimentación se determinó también analizando la concentración de  $^7\text{Be}$  en incrementos de profundidad.

Una vez cortados a la profundidad de penetración del  $^7\text{Be}$ , los cilindros colectados en las grillas se prepararon para espectrometría gama de la forma descrita para las muestras procedentes del área de referencia. Los análisis gama se realizaron con un detector de Ge hiper puro de 28% de eficiencia relativa, de alta resolución y bajo fondo, sistema analizador Nuclear Data y software Canberra Genie 2000, mediante conteo de 72.000 s.

#### 4.6 Análisis estadísticos

Para el análisis estadístico se utilizó un análisis de varianza (ANOVA), con un nivel de confianza de 0,05, para comparar la forma de distribución de los resultados de distribución de suelo, obtenidos por el método de clavos de erosión, con el fin de establecer si existen diferencias significativas entre los tres distanciamientos de rumas de desecho (10 m (RD10), 15 m (RD15) y 30 m (RD30)); además entre la parcela de 18 metros (RD18), la que posee una pendiente distinta.

Por último, se realizó ésta comparación, en los resultados obtenidos por ambos métodos (clavos de erosión y  $^7\text{Be}$ ) con el fin de estudiar la posible validación de los resultados obtenidos a través de mediciones de  $^7\text{Be}$ .

## 5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Comportamiento de los factores determinantes de las tasas de erosión

#### 5.1.1 Precipitaciones

La lluvia es uno de los factores más importantes en los procesos erosivos, alrededor del 95% del suelo erosionado es removido por causa de las gotas de ésta. Las características que presentan mayor incidencia son: la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones. La Figura 4 representa la precipitación diaria entre el 01 marzo y 30 de octubre del 2007, la cual fue registrada con un pluviógrafo que se instaló en el área de estudio. Los datos medidos con el pluviógrafo fueron corroborados con los obtenidos mediante otros dos pluviógrafos ubicados en la cuenca experimental Los Pinos, a través de gráficos de doble tendencia, los cuales se presentan en el Anexo 3.

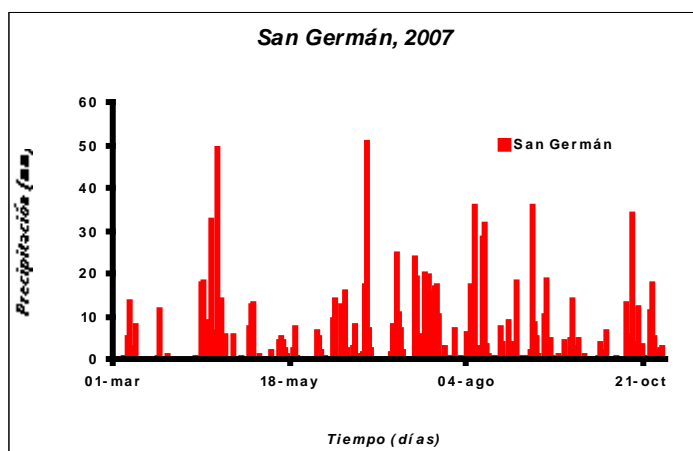


Figura 4. Precipitación diaria en el área de estudio.

La precipitación total medida desde el 01 de marzo hasta el 30 de octubre corresponde a 1.101 mm. Lo cual es bajo para la media histórica registrada por la estación meteorológica Isla Teja<sup>1</sup> en los últimos 45 años, con un promedio de 2.307 mm para el mismo período. Según las mediciones de Ulloa (2007) en la zona de estudio cayeron en ese mismo período 2.517 mm, deduciéndose así que el año 2007 presentó un déficit de lluvias.

En la Figura 4 es posible observar la ocurrencia de eventos de precipitación de importancia, específicamente entre el 02 de abril y el 25 del mismo mes, que corresponden a 165 mm. En este período se registraron lluvias cortas y de gran intensidad entre los días 12 y 14 de abril con una duración total de 38 h y un aporte de 39,7 mm, lo que representa el 23% de la precipitación caída en el mes y una

<sup>1</sup> Datos estación meteorológica Isla Teja (1960-2005), Instituto de Geociencias.

intensidad máxima de  $9 \text{ mm h}^{-1}$ . Otro evento erosivo se produjo entre los días 16 y 17 con una intensidad máxima de  $8,2 \text{ mm h}^{-1}$ , una duración total de 20 h, y aportes de agua lluvia total de 53,1 mm, lo que representa el 30,6%, lo cual implica un 92,8% de la precipitación total de mes.

Trascurrido el periodo erosivo del mes de abril no se aplico la técnica del  $^7\text{Be}$  para evaluar la redistribución de suelo, debido a que el depósito de  $^7\text{Be}$  ( $A_{ref}$ ) era escaso.

Entre el 01 de junio y el 01 de agosto la precipitación total registrada fue de 319,4 mm, y corresponde a 35,6% de las precipitaciones totales registradas, desde el 01 de marzo hasta el 30 de octubre (Figura 5). Se puede observar claramente, que existen tres eventos erosivos importantes en este período, pero que no alcanzan los valores antes mencionados en intensidad. El primero es entre el 20 y 22 de junio el cual alcanza cifras de 68,9 mm en 49 h con una intensidad máxima de  $6,7 \text{ mm h}^{-1}$ , luego entre los días 12 y 13 de julio registra valores máximos en intensidad de  $4 \text{ mm h}^{-1}$  con una precipitación de 41,2 mm en 36 h. Por último un evento de mucha duración que es entre los días 18 y 23 del mismo mes el cual aporta precipitaciones del orden de los 82,5 mm en un tiempo de 113 h, el cual alcanza los  $5,5 \text{ mm h}^{-1}$  como intensidad máxima. Estos tres eventos aportan el 49,2% del total de las precipitaciones del período de medición.

Como se ha descrito anteriormente, para aplicar la técnica de  $^7\text{Be}$ , debe producirse un período con características de una lluvia de baja erosividad que deposite de forma homogénea éste radionucleido en el sitio de estudio, seguido de un evento erosivo con intensidad suficiente para producir redistribución de suelo. Por las características de la distribución de las precipitaciones durante el período de la presente investigación, sin que se registraran largos períodos sin precipitación erosiva se decidió aplicar el método de  $^7\text{Be}$  transcurridos los eventos erosivos registrados entre el 01 de junio y el 01 de agosto.

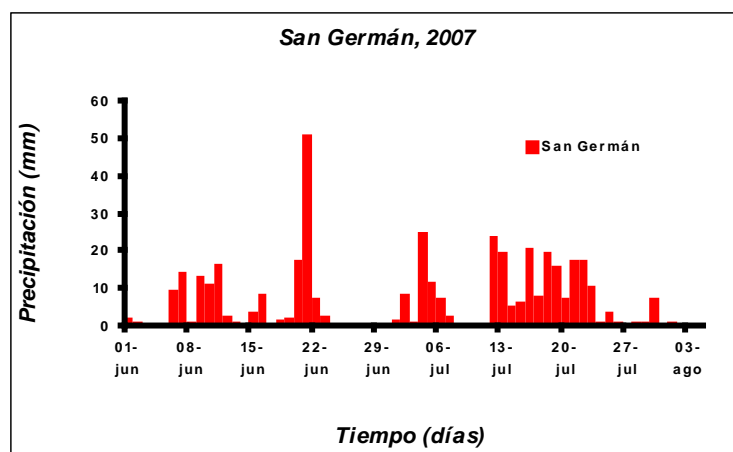


Figura 5. Precipitación diaria en el período de comparación de los resultados obtenidos aplicando los métodos de  $^7\text{Be}$  y clavos de erosión.



### 5.1.2 Densidad aparente

La densidad aparente,  $D_a$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ), correspondiente a los primeros milímetros del suelo para cada período, se calculó en las muestras colectadas en el sitio de referencia (Cuadro 3). Posteriormente se utilizó la  $D_a$  de 0 a 2 mm para el cálculo de redistribución de suelo con la metodología de los clavos de erosión.

Cuadro 3. Densidades ( $\text{g cm}^{-3}$ ) del suelo en sitio de referencia, predio San Germán.

Profundidad (mm)	02abr (*)	25abr (*)	01jun (*)	03jul (&)	01ago (&)	07sep (&)	02oct (&)	30 oct (&)	Promedio
0 -2	0,59	0,39	0,47	0,50	0,41	0,43	0,52	0,39	0,46
2 -4	0,55	0,36	0,48	0,50	0,37	0,43	0,52	0,42	0,45
4 -6	0,54	0,40	0,46	0,49	0,32	0,44	0,51	0,41	0,45
6 -8	0,59	0,43	0,47	0,52	0,29	0,46	0,50	0,42	0,46
8 -10		0,42	0,46	0,53	0,30			0	0,43
10 -12				0,52	0,31			0	0,42
8 -14						0,48	0,49	0,42	0,46

Nº de cilindros utilizados

(\*) = 8

(&) = 16

Se observa que la densidad aparente del suelo varía para cada fecha de medición entre los 0,4 y 0,6  $\text{g cm}^{-3}$  a causa probablemente de las variaciones en puntos de muestreo. Sin embargo a través del análisis estadístico no se encontraron diferencias significativas con un nivel de confianza de 0,05. En profundidad la  $D_a$  promedio es de 0,45  $\text{g cm}^{-3}$ , no variando considerablemente.

### 5.1.3 Pendiente

La pendiente de las parcelas de estudio se presenta en el Cuadro 4. Para tres de las parcelas estudiadas (RD10, 15 y 30) la diferencia de pendiente no supera al 7% entre ellas. Sin embargo, se da un caso especial en la parcela RD18 la cual presenta una pendiente muy pronunciada igual a 45%.

Cuadro 4. Pendiente de cada parcela.

Parcela	Longitud de pendiente (m)	Pendiente longitudinal	
RD 10	10	26%	15°
RD 15	15	30%	17°
RD 18	18	45%	24°
RD 30	30	33%	18°

La pendiente es importante por su efecto en el drenaje, la erosividad y la estabilidad del suelo, ya que mientras mayor es la pendiente existe menos tiempo para drenar y mayor es el riesgo de erosión y deslizamiento de tierra debido a la mayor velocidad de escurrimiento del agua. Morgan (1996), indica que la erosión aumenta considerablemente con cambios en grados de pendiente sobre los 8° - 10° (14,1 –

17,6 %). Es decir, con diferencias menores o iguales a  $10^0$ , entre dos situaciones de laderas, estas no deberían tener redistribuciones de suelo diferentes. Con esto, los montos de erosión para las parcelas de pendiente similar, no deberían ser significativos entre sí, exceptuando la RD18. Para el sector forestal, según Schlatter *et al.*, (2003), las parcelas RD10 y 15 presentarían una inclinación pronunciada (15 – 30%) y las parcelas RD18 y 30 una inclinación muy pronunciada (30 – 58%), clasificándolas por su pendiente con una capacidad de uso del suelo de VII.

## 5.2 Redistribución de suelo, utilizando clavos de erosión

En el Anexo 4, Cuadro 2, se muestran los resultados de erosión media, sedimentación media, erosión neta, sedimentación neta y fracción de sedimentos movilizados, en toneladas por hectárea. A continuación en la Figura 6, se presenta la redistribución neta mensual por parcelas y período; los montos negativos representan erosión y los positivos sedimentación.

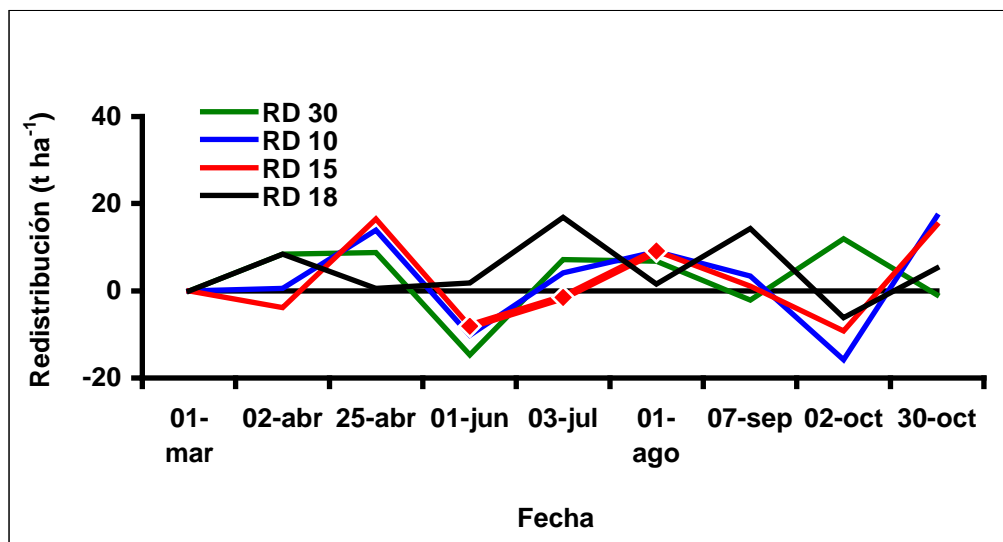


Figura 6. Redistribución neta mensual.

La redistribución neta mensual presenta un comportamiento fluctuante a través del tiempo para todas las parcelas. El análisis estadístico determinó que no existen diferencias significativas para los montos de redistribución neta mensual para todas las situaciones en estudio (Anexo 5).

En la Figura 7, se presenta la redistribución neta acumulada, para las parcelas RD10, 15, 18 y 30.

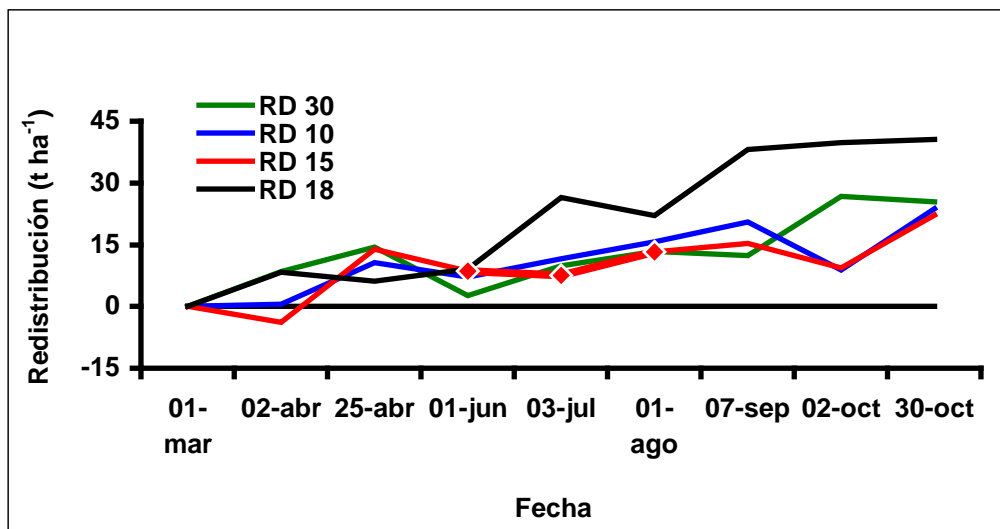


Figura 7. Redistribución neta acumulada.

Esta Figura reafirma lo expresado anteriormente, en relación a la tendencia similar entre las parcelas RD10, 15 y 30, ya que presentan una sedimentación neta acumulada de 23,8, 22,8 y 25,4 t ha<sup>-1</sup> respectivamente. En cambio el valor obtenido para la parcela RD18 se eleva a 40,6 t ha<sup>-1</sup>, siendo un 71% superior a la media (23,8 t ha<sup>-1</sup>) de las otras tres parcelas.

Además se puede observar que en los dos primeros eventos erosivos del mes de abril llovió 209,2 mm, lo que representa sólo un 19% del total acumulado, éstos produjeron un 45, 63 y 57% de la sedimentación neta acumulada en las parcelas RD10, 15 y 30 respectivamente. Lo anterior se puede explicar porque en un comienzo el suelo estaba gravemente disturbado por las faenas de cosecha y por ende presentaba muy baja cohesión de las partículas de suelo, lo cual se tradujo en una mayor movilización del suelo superficial.

Estadísticamente analizados los valores de redistribución neta en la condición RD18, arrojó que es significativamente distinta, comparada con todas las demás, debido a la pendiente, que al ser más pronunciada impide la infiltración del agua, escurriendo superficialmente y produciendo mayor arrastre de partículas de suelo. Además Schlatter *et al.*, (2003), comenta que existe una forma distinta de pérdidas de suelo, la cual corresponde al deslizamiento de material a causa de las pendientes superiores a 45%; esto a causa de la pérdida de cohesión de las partículas de suelo con el sustrato en el que se apoya causado por saturación de agua, la falta de raíces aglutinantes de los árboles o el impulso de vibraciones de maquinaria o fuerzas mayores como sismos.

En el caso de la parcela RD10, la redistribución de suelo no presentó diferencias estadísticamente significativas con la RD15 y 30. Sin embargo, el análisis de varianza ANOVA entre RD15 y 30 presenta diferencias significativas, esto debido a

que presentan montos de redistribución netos distintos, pero sus valores netos finales son muy similares. Sin embargo, estas diferencias se deberían a la distancia entre rumas de desechos entre parcelas de similar pendiente ya que al ser de mayor longitud (RD30) favorece el transporte de partículas a causa de la lluvia que escurre superficialmente, aumentando su velocidad a lo largo de ésta. Morgan (1996) señala que en longitudes de parcela menores, el flujo superficial del agua alcanza menor energía, además las condiciones de las rumas de desecho que actúan como barrera provocando la depositación del suelo, siendo los principales factores la perpendicularidad al sentido de la pendiente, el ordenamiento de estos residuos vegetales y su granulometría.

Se puede apreciar que en todas las situaciones en estudio se produce sedimentación. Esto es atribuible a la construcción de la barrera superior, en la cual al ser ordenados los desechos en fajas y en el sentido de las curvas de nivel, por medio del bulldózer, se incorporó suelo como parte de la ruma; a medida que se producían las precipitaciones. Este suelo posteriormente se incorporó a las parcelas. Sin embargo, los montos de redistribución neta acumulada se deberían a la eficiencia en la construcción de las rumas de desecho. Pero evaluando estos montos RD15 presenta los menores valores de redistribución de suelo producidos por la combinación del distanciamiento y la eficiencia en la construcción de las barreras.

Se puede mencionar también que en terreno existían signos evidentes de erosión en forma de regueros entre los transectos de clavos de erosión y de muestreo de  $^7\text{Be}$ . Estos montos no fueron registrados por ninguno de los dos métodos provocando un sesgo en la información recopilada, a causa de la distribución aleatoria de los regueros dentro del terreno estudiado.

A continuación se presentan los resultados de redistribución neta acumulada de suelo obtenidos por Ulloa (2007), recopilados durante el año 2006 entre el 31 de marzo y el 30 de noviembre, para dos parcelas con un distanciamiento entre rumas de desecho de 15 y 30 m (P15 y P30) en el sitio Monumento, cercano a San Germán.

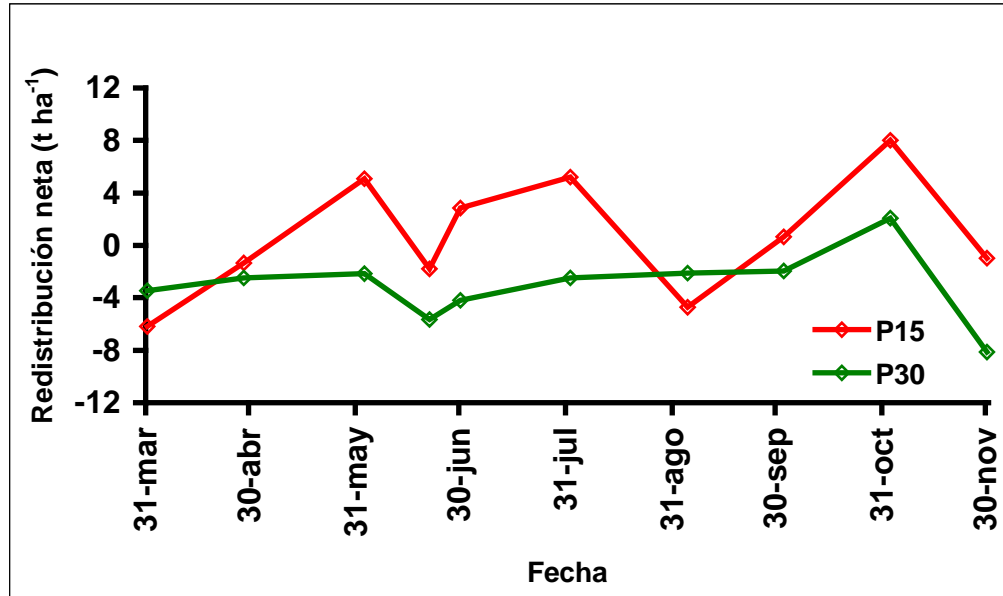


Figura 8. Redistribución neta acumulada en el año 2006, obtenidas por Ulloa (2007)

En la Figura 8, los montos negativos representan erosión y los positivos sedimentación. Se puede apreciar que Ulloa (2007) obtuvo montos de redistribución neta acumulada de material a lo largo de su período de medición, variables entre parcelas, como también entre montos de erosión y sedimentación, en comparación a lo registrado en este estudio que presenta montos de sedimentación neta acumulada a lo largo del estudio.

El análisis estadístico arrojó que la erosión de estas parcelas muestra diferencias significativas entre ellas (con un nivel de confianza de 0,05 entre los resultados de P15 y P30); Ulloa (2007) atribuye estas diferencias a la capacidad de las rumas de residuos a retener partículas de suelo.

La comparación estadística de montos netos mensuales de redistribución de suelo entre P15 y RD10, 15 y 30 no presentan diferencias significativas. Sin embargo, a nivel del total de los períodos estudiados los valores de redistribución neta acumulada reflejan diferencias entre sí. En el caso de P30 mostró diferencias significativas entre todas las combinaciones. Dichas diferencias se atribuyen a distintos montos de precipitación, los cuales para el estudio anterior presentan 2.517 mm, comparado con los 1.101 mm registrados en el mismo período de medición para el estudio actual. Los niveles de pendiente para ambos estudios son similares, no siendo variables de discusión.

Analizando los suelos en cuestión, se puede apreciar que existe una leve susceptibilidad a erosionarse del suelo del ensayo Monumento en comparación con el de San Germán. Esto se debería a que este último marcaría cierta diferencia al tener un porcentaje mayor de carbono (ver Anexo 6), el cual tiene relación directa con la estabilidad de los agregados, disminuyendo la erosión de los suelos en

comparación con aquellos suelos menos estables. Además de lo anterior tiene influencia directa la textura del suelo, siendo más susceptibles aquellas texturas que presentan partículas más finas, presentando mayor erosión y arrastre en suelos con pendiente.

La consecuencia del uso de las rumas de desechos pareció ser favorable, lo cual concuerda con estudios citados por Morgan (1996) que entrega montos de pérdidas de suelo anuales de 126,6 y 43 t ha<sup>-1</sup> en parcelas sin cubierta protectora, en comparación a valores de 0,9 y 3,8 t ha<sup>-1</sup> en situaciones con cobertura. Morgan también comenta, que una de las características de la vegetación protectora del suelo es absorber la energía del agua en movimiento. En base a esto, las rumas de desecho absorben dicha energía, frenando las partículas de suelo que se movilizan ladera abajo.

Acerca del distanciamiento entre rumas de desecho como se mencionó en párrafos anteriores, se presentan diferencias entre RD15 y 30, debido a la longitud entre rumas de desecho: RD15 muestra ventajas con respecto a los montos de redistribución en comparación a todas las situaciones; RD 18 se ve fuertemente influenciada por el factor pendiente, el cual aumenta los montos de redistribución acumulada mensual y neta.

### **5.3 Variación temporal y distribución en profundidad del inventario de <sup>7</sup>Be en el área de referencia**

De acuerdo a lo comentado en párrafos anteriores, la evidencia experimental indica que la concentración másica y la actividad superficial de <sup>7</sup>Be decrecen exponencialmente en profundidad (Blake *et al.*, 1999; Walling *et al.*, 1999; Schuller *et al.*, 2006).

En la Figura 9 se muestra el decrecimiento de la actividad superficial de <sup>7</sup>Be en profundidad en el sitio de referencia, para cada una de las fechas de medición. También se señala el inventario de referencia de <sup>7</sup>Be ( $A_{ref}$ ) para cada una de las fechas puntuales de medición que van desde 01 marzo hasta el 30 de octubre del 2007. Las líneas continuas representan la simulación del decrecimiento en profundidad a partir de los datos medidos en el sitio de referencia, graficados con triángulos.

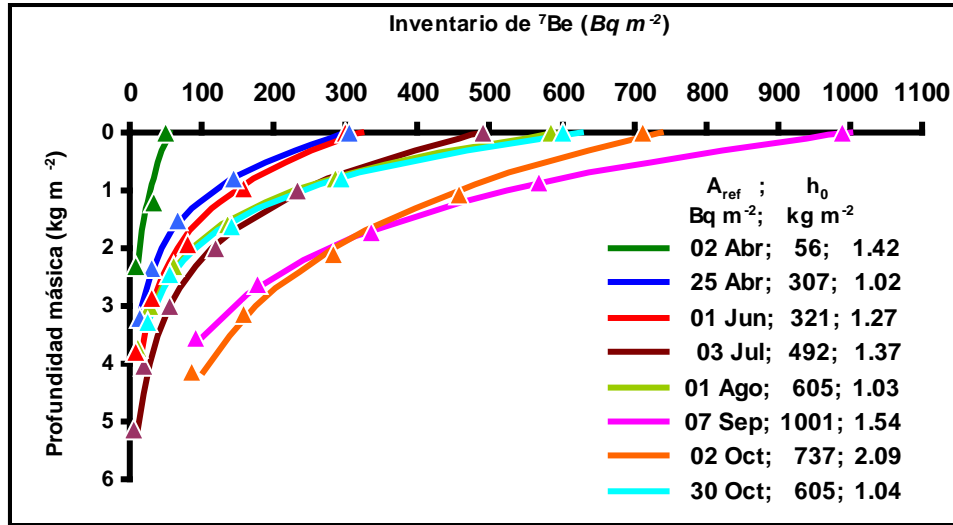


Figura 9. Decrecimiento de la actividad superficial de  ${}^7\text{Be}$  en profundidad en el sitio de referencia, para cada una de las fechas de medición.

El Cuadro 5 presenta las mediciones del inventario de referencia ( $A_{ref}$ ), profundidad másica de relajación ( $h_0$ ); además presenta las precipitaciones en cada periodo (Pp) a lo largo del estudio.

Cuadro 5. Inventario de referencia, profundidad másica de relajación en cada fecha de medición y precipitación de cada periodo, para cada una de las fechas de medición.

Fecha recolección	$h_0$ ( $\text{kg m}^{-2}$ )	$A_{ref}$ ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	Período		$A_{dep}$ ( $\text{Bq m}^{-2}$ )
			Fechas	Pp (mm)	
02-abr	1,42	56	01 Mar - 02 Abr	55	72
25-abr	1,02	307	02 Abr - 25 Abr	208	302
01-jun	1,27	321	25 Abr - 01 Jun	97	171
03-jul	1,37	492	01 Jun - 03 Jul	210	346
01-ago	1,03	605	03 Jul - 01 Ago	282	330
07-sep	1,54	1001	01 Ago - 07 Sep	263	808
02-oct	2,09	737	07 Sep - 02 Oct	85	17
30-oct	1,04	625	02 Oct - 30 Oct	161	108

Se observa que existe una tendencia de incremento de la actividad superficial del radionucleido en el sitio de referencia en los meses de mayor precipitación. En efecto, se determinó que el coeficiente de correlación entre el depósito mensual de  ${}^7\text{Be}$  en el suelo y la precipitación mensual es de 0,767. Esta dependencia es mencionada por Kaste (2002), el cual afirma que el  ${}^7\text{Be}$  es lavado desde la atmósfera por la lluvia, depositándose en el suelo; además las cantidades de éste son proporcionales a los volúmenes de agua caída, indicando valores de flujo atmosférico anuales entre los 1.000 a 6.500  $\text{Bq m}^{-2}$ , donde los máximos valores corresponden a la temporada primaveral.

La Figura 10, representa el decrecimiento de la actividad superficial de  $^7\text{Be}$  en profundidad en el sitio de referencia para la fecha puntual de medición del inventario de  $^7\text{Be}$  a lo largo de los transectos de pendiente.

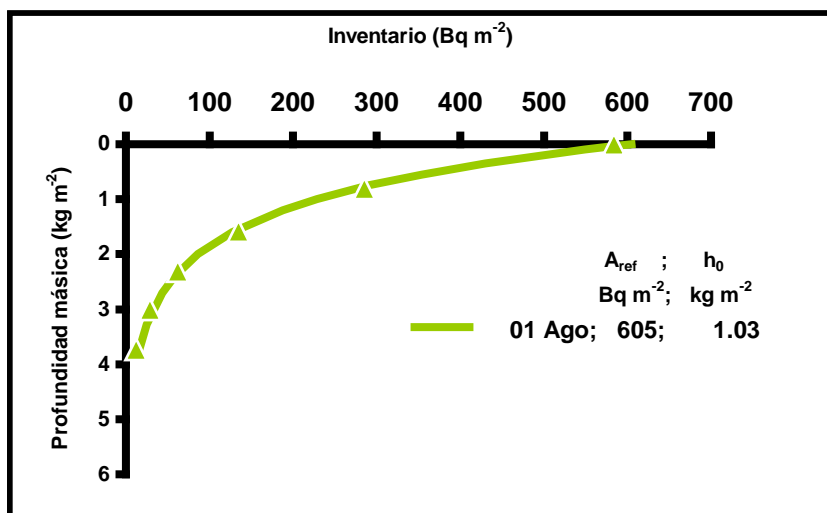


Figura 10. Decrecimiento de la actividad superficial de  $^7\text{Be}$  en profundidad en el sitio de referencia, para la fecha de medición.

El inventario de referencia ( $A_{ref}$ ) con el cual se trabajó para calcular los montos de redistribución de suelo corresponde al estimado a partir de la medición del 01 de agosto, el cual es de  $605 \text{ Bq m}^{-2}$ , siendo la profundidad másica ( $h_0$ ) de  $1,03 \text{ kg m}^{-2}$ . El coeficiente de correlación de entre el logaritmo natural de la actividad superficial de  $^7\text{Be}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) de los primeros cuatro puntos y la profundidad másica de éstos (situados en los primeros 8 mm), es de 0,998, corroborando el decrecimiento exponencial de la actividad superficial en profundidad y explicando la gran similitud entre el inventario de referencia medido ( $584 \pm 60 \text{ Bq m}^{-2}$ ) y estimado.

Walling *et al.*, (1999), obtuvo un inventario de referencia de  $533 \text{ Bq m}^{-2}$ , con una profundidad másica de  $5,4 \text{ kg m}^{-2}$ , en un terreno de uso agrícola cercano a Crediton, Devon, UK.

Schuller *et al.*, 2006, menciona que para suelos del predio Los Pinos, Región de los Ríos, sometidos a cosecha forestal se determinó un inventario de referencia  $A_{ref} = 573 \text{ Bq m}^{-2}$  y  $h_0$  de  $2,14 \text{ kg m}^{-2}$ . Por último, Ulloa (2007), determinó un inventario de referencia de  $1.001 \text{ Bq m}^{-2}$  y una profundidad másica de relajación de  $1,59 \text{ kg m}^{-2}$  en un sitio contiguo, bajo otras condiciones de precipitación.

#### 5.4 Comparación de la redistribución de suelo mediante el uso de la metodología de $^7\text{Be}$ y Clavos de erosión

El evento erosivo estudiado que produjo redistribución de suelo, se manifestó entre las fechas 01 junio y 01 de agosto con una precipitación total de 389,8 mm



equivalente al 35,4% de la precipitación total del período de estudio, tal como se mencionó en el punto 5.1.1. Cabe destacar que no fue posible aplicar el método de  $^7\text{Be}$  para estimar redistribución de suelo asociada a las intensas lluvias que se presentaron en el mes de abril debido a que el inventario de  $^7\text{Be}$  con anterioridad a dichos eventos fue de solo  $56 \text{ Bq m}^{-2}$ , monto muy reducido como para aplicar el método (ver Figura 9).

El Cuadro 6 entrega los resultados de los montos de redistribución de suelo generados en el período de comparación del 01 junio hasta el 01 de agosto utilizando  $^7\text{Be}$  y clavos de erosión. Es importante mencionar que la información obtenida para RD30 en el período de estudio se perdió parcialmente durante el siniestro que afectó al edificio Emilio Pugín en diciembre de 2007, por lo que los resultados de aplicación de la metodología de  $^7\text{Be}$  quedaron inconclusos para esta parcela.

Cuadro 6. Comparación de resultados obtenidos utilizando clavos de erosión y  $^7\text{Be}$ , para las diferentes parcelas.

Parámetros	$^7\text{Be}$	Clavos	$^7\text{Be}$	Clavos	$^7\text{Be}$	Clavos
	RD10	RD10	RD15	RD15	RD18	RD18
Erosión media ( $\text{t ha}^{-1}$ )	2,5	8,7	1,3	5,3	3,4	6,7
Fracción del área erosionada (%)	13	13	31	19	2	22
Sedimentación media ( $\text{t ha}^{-1}$ )	4,1	17,3	4,0	11,9	5,9	32,6
Fracción del área sedimentada (%)	88	79	69	75	98	78
Sedimentación neta ( $\text{t ha}^{-1}$ )	3,9	12,6	2,4	7,9	5,7	23,8

Los resultados indican que según el método del  $^7\text{Be}$  los montos de sedimentación neta varían entre 3,9, 2,4 y  $5,7 \text{ t ha}^{-1}$  para las parcelas RD10, 15 y 18 respectivamente. La metodología de clavos de erosión, presenta valores de sedimentación neta para las parcelas RD de 12,6, 7,9 y  $23,8 \text{ t ha}^{-1}$ .

La parcela que presentó los menores montos en todos los parámetros calculados fue la RD15; mientras que RD18 posee los mayores montos de erosión media, sedimentación media y sedimentación neta para ambos métodos. Ello se debería como se ha mencionado en párrafos anteriores a la influencia de la mayor pendiente de esta parcela (45%).

Las mediciones realizadas por Ulloa (2007) arrojaron montos de erosión neta para P15 y P30 de  $0,9$  y  $2,5 \text{ t ha}^{-1}$  respectivamente y no presentando valores de sedimentación neta comparables con éste estudio. Menciona también que no existen variaciones estadísticamente significativas entre los montos de redistribución de  $^7\text{Be}$  y clavos de erosión.

Sin embargo, el análisis estadístico de este estudio sí reflejó diferencias significativas entre montos de redistribución comparando ambos métodos. Esto se atribuye principalmente a que el uso de mediciones de  $^7\text{Be}$  propuesto para estimar montos de erosión se basa en trabajos realizados por el Prof. Dr. Walling en Europa y al modelo desarrollado en base a ésta investigación. Para su aplicación requiere de períodos prolongados sin lluvia erosiva antes de ser utilizado, condición climática que no se

dio sobre la cuenca Los Pinos durante el presente trabajo. Ello hace que los montos de redistribución estimados con  $^7\text{Be}$  sean inferiores a los que se desarrollan en terreno. De acuerdo a los resultados obtenidos, existe la necesidad de refinar la técnica de  $^7\text{Be}$  y el modelo asociado de conversión a montos de redistribución de suelo, de modo de poderlos aplicar reiteradamente en áreas de frecuente ocurrencia de eventos erosivos importantes, como las del sur de Chile. El refinamiento sugerido permitiría la estimación de redistribución de suelo en períodos adicionales de intensa precipitación sin la necesidad de esperar períodos sin lluvia erosiva entre eventos, contribuyendo así a incrementar la representatividad de los resultados

El análisis estadístico de los resultados de erosión/sedimentación obtenidos en los puntos de muestreo situados a lo largo de las pendientes refleja que la utilización del método de  $^7\text{Be}$  presenta valores más homogéneos en la redistribución de suelo que los obtenidos utilizando clavos de erosión, pudiendo ser una ventaja ya que presenta menor variación entre puntos de muestreo. Schuller *et al.*, (2006) argumentan dentro de las ventajas del uso del radionucleido como trazador de redistribución de suelos que cada muestra representa una fracción de superficie mayor comparada con la de los clavos de erosión, que representan una porción muy reducida de superficie. Las mediciones hechas con clavos de erosión son influenciadas por efecto del micro relieve, la perturbación que producen al flujo de sedimentos y dificultad de medición. En el Anexo 7 se detallan los valores de redistribución de suelo obtenidos a lo largo de los transectos de pendiente en RD10, 15 y 18 utilizando el método del  $^7\text{Be}$  y clavos de erosión ( $\text{t ha}^{-1}$ )

## 6. CONCLUSIONES

Mediante la utilización del radionucleido cosmogénico  $^7\text{Be}$  se estimaron montos de redistribución de suelo para tres situaciones de distanciamiento entre rumas de desecho (RD10, 15 y 18) instaladas en un sitio sometido a cosecha forestal a tala rasa, obteniendo como resultado sedimentación neta en todas las parcelas.

La comparación de los resultados obtenidos utilizando el método de  $^7\text{Be}$  con los estimados con clavos de erosión, mostró diferencias significativas entre montos de redistribución de suelo, por lo que no se logró validar el método de  $^7\text{Be}$ . Ello se debería a que no se cumplieron las condiciones de un período prolongado sin lluvias erosivas antes de los eventos erosivos evaluados mediante el uso de  $^7\text{Be}$ . De acuerdo a los resultados obtenidos, existe la necesidad de refinar la técnica de  $^7\text{Be}$  y el modelo asociado de conversión a montos de redistribución de suelo, de modo de poderlos aplicar reiteradamente en áreas de frecuente ocurrencia de eventos erosivos importantes, como las del sur de Chile. El refinamiento sugerido permitiría la estimación de redistribución de suelo en períodos adicionales de intensa precipitación sin la necesidad de esperar períodos sin lluvia erosiva entre eventos, contribuyendo así a incrementar la representatividad de los resultados

El análisis estadístico evidenció mayor homogeneidad en los montos de redistribución de suelo en el sentido longitudinal de la pendiente estimados utilizando  $^7\text{Be}$ , lo cual potencia el uso de esta técnica para la documentación de tasas de redistribución de suelo.

Comparando los resultados de redistribución de suelo entre rumas consecutivas obtenidas durante este trabajo, con los generados durante el primer año (2006) de la investigación, se concuerda que las rumas de desecho son de gran utilidad en el control de pérdidas de suelo. El diseño de construcción de las rumas de desecho forestales fue más eficiente durante el desarrollo de la presente investigación debido a que minimizaron la salida del material desde las parcelas, frenando su fuga.

Se puede decir, que el comportamiento general de la redistribución de suelo, para estas condiciones está más relacionado con el ángulo de pendiente de las parcelas que con el largo de éstas. Para pendientes de aproximadamente 29% se pudo distinguir que el mejor distanciamiento entre rumas de desechos es entre 10 y 15 m, por presentar valores de redistribución neta similares. Sin embargo, por motivos de espaciamiento en terreno y aprovechamiento del sitio para la plantación siguiente, se recomendaría utilizar separaciones de 15 m.

Se recomienda paralelamente a la labor de refinamiento del método de  $^7\text{Be}$  realizar una nueva investigación, que incorpore los distanciamientos de 10 y 15 m en pendientes mayores a 30%, para así contribuir a mejorar el diseño de la práctica de arrumado de residuos forestales.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Ayres, C. 1960. La Erosión del suelo y su control. Barcelona, España. 437 p.
- Blake, W., Walling, D., He, Q. 1999. Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations. Applied Radiation and Isotopes 51(1999): 599-605
- Bosch, H. 1965. Nociones de Física Nuclear y Radiodosimetría. Buenos Aires, EUDEBA. 63 p.
- Conaf 1981. Edición especial ' 81. Chile Forestal. Chile 95 p.
- Daniel, T.; Helmes, J.; Backer, F. 1982. Principios de silvicultura. Trd. por Ramón Helizondo. México. Mcgraw-hill. 492p.
- Di Castri, F.; Hajek, E. 1976. Bioclimatología de Chile. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago. 128 pp.
- Donoso, C. 1981. Ecología forestal. El bosque y su medio ambiente. Santiago, Chile. Universitaria. 369p.
- Duran, F. 1970. La conservación del suelo y la erosión. Santiago, Chile. 234 p.
- FAO. 1967. La Erosión del Suelo por el Agua. Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. Roma, Italia. 207p.
- FAO. 1961. La Erosión Eólica y medidas para combatirla en los suelos agrícolas. Roma, Italia. 83 p.
- Fuenzalida, E. 1965. Clasificación de los climas. In: Geografía económica de Chile. Texto refundido. Santiago, CORFO. 885 p.
- Gayoso, J.; Acuña, M. 1999. Guía de campo. Mejores prácticas de manejo forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 118p.
- Grez, R.; Piel, L.; Añazco, R.; Gerding, V.; Schlatter, J.; Romeny, G. 2002. Manual de laboratorio para análisis de suelo. Laboratorio de Nutrición y Suelos Forestales. Instituto de Silvicultura. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. 144 pp.
- Huber, A. 1970. Diez años de observaciones climatológicas en la estación Teja-Valdivia (Chile) 1960-1970. Valdivia. Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. Instituto de Geología y Geografía. Universidad Austral de Chile. 52 p.

- Ibarra, M.; Mancilla, G. Peralta, M. s.f. Evaluación de la erosión hídrica bajo tres tipos de cubierta arbórea en la Cordillera de Nahuelbuta. Santiago, Chile. 12p.
- Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales, Corporación de Fomento de la Producción, Universidad Austral de Chile. 1978. Estudio del suelo de la Provincia de Valdivia. Santiago, IREN-CORFO-UACH. 178 p.
- Iroumé, A.; Gayoso, J.; Infante, L. 1989. Erosión hídrica y alteración del sitio en cosecha a tala rasa. Valdivia, Chile. Ecol. Biol. Sol. 26 (2): 171 – 180.
- López, F.; Blanco, M. 1968. Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica, y del transporte y depósito de materiales. Madrid, España. 190p.
- López, F.; Blanco, M. 1976. Hidrología forestal. Escuela técnica superior de Ingenieros de Montes. Madrid, España. 387p.
- Morgan, R.P.C. 1996. Erosión y conservación del suelo. Madrid, España. 343p.
- Peña, L.; Carrasco, P.; Figueroa, M.; Oyarzún, C; Lo Cascio, B. 1993. Pérdidas por erosión hídrica en suelos agrícolas y forestales de la cuenca del río Bío-Bío. En: Elementos cognoscitivos sobre el recurso suelo y consideraciones generales sobre el ordenamiento agroforestal. Serie: Propuestas de ordenamiento, volumen 4. Francesco Faranda, Oscar Parra (eds). Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción. 105p.
- Peralta, M. 1976. Uso, Clasificación y Conservación de suelos. Santiago. SAG. 337 p.
- Kaste, J.; Norton, S.; Hess, Ch. 2002. Environmental Chemistry of Beryllium-7. Rev. Mineral. Geochem. 50: 271-289.
- Schuller, P., Iroumé, A., Mancilla, H.B., Trumper, R.E., Castillo, A. 2004. Applicability of the  $^7\text{Be}$  technique to estimate soil redistribution rates associated to recent forest harvest operations in the Lake Region of Chile. Second Research Co-ordination Meeting of the Co-ordination Research Project “Assess the effectiveness of soil conservation techniques for sustainable watershed management using fallout radionuclides (D1-50.08)”, Istanbul, Turkey, 4-9 October 2004.
- Schuller, P.; Iroumé, A.; Walling, D.; Mancilla, H.; Castillo, A.; Trumper, R. 2006. Use of  $^7\text{Be}$  to document soil redistribution following forest harvest operations. Journal of Environmental Quality 35: 1756-1763.
- Schlatter, J.; Grez, R.; Gerding, V. 2003. Manual para el Reconocimiento de Suelos. 3ª Ed. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile (114p + 9 Anexos).

- Ulloa, H. 2007. Evaluación del control de erosión asociada al arrumado de residuos en tala rasa. Tesis Ing. For. Valdivia, Universidad Austral de Chile, Fac. de Cs. Forestales. 29p.
- Wallbrink, P., Roddy, B., Olley, J. 2002. A tracer budget quantifying soil redistribution on hillslopes after forest harvesting. *Catena* 47(2002): 179-201
- Walling, D., He, Q., Blake, W. 1999. Use of  $^7\text{Be}$  and  $^{137}\text{Cs}$  measurements to document short- and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land. *Water Resources Research* 35(12): 3865-3874

## **ANEXOS**

Anexo 1  
Abstract and Keywords



## SUMMARY

This study is aimed to improve the design of woody trash barriers built using logging debris after final forest harvest. Different spacings among barriers are studied to assess the effect in controlling erosion and trapping sediments. To estimate soil redistribution in clearcut areas the  $^7\text{Be}$  method was used. Additionally, for studying the possible validation of this method the results were compared with soil redistribution measured using erosion pins. The results were also compared with those obtained in 2006, the first year of the investigation.

The study was carried out in the San Germán forest farm, belonging to the Forest Research Centre (CEFOR), Faculty of Forest Sciences, Universidad Austral de Chile, between March and November 2007, in a recently clearcutted area. In the study site four plots with different spacings among woody trash barriers (RD plots) were established, three of those with average slope of 29% and the other with 45% slope. Each one of the plots was identified through a coordinated system, in which superimposed sampling grids for  $^7\text{Be}$  and erosion pins were defined. Monthly samples were collected for  $^7\text{Be}$  measurements at the reference site. An additional sampling after an important erosive event was performed along the slope transects. In the case of the erosion pins, monthly periodic measurements were realized.

Using erosion pins during the total observation period, the RD10, 15 and 30 plots showed an accumulated net sedimentation of 23.8, 22.2 and 25.4  $\text{t ha}^{-1}$ , respectively. On the other hand the value obtained for the RD18 plot was 40.6  $\text{t ha}^{-1}$ , a 71% higher than the mean (23.8  $\text{t ha}^{-1}$ ) of the other three plots.

The results obtained in years 2006 and 2007 are statistically different. The differences can be explained by the different rainfall totals measured for the same periods in each year, with 2517 mm in 2006 and 1101 mm in 2007.

For the erosive events preceding August 1<sup>st</sup> 2007, net sedimentation measured using the  $^7\text{Be}$  method is 3.9, 2.4 and 5.7  $\text{t ha}^{-1}$  for RD10, 15 and 30, respectively. Using erosion pins, net sedimentation values for the RD10, 15 and 30 plots were 12.6, 7.9 and 23.8  $\text{t ha}^{-1}$ . Statistically significant differences were detected comparing the results from the two methods. This is attributed to the fact that in climates with frequent and abundant rainfalls like in the research site, the ideal conditions required by the  $^7\text{Be}$  method are not satisfied. These conditions are a low rainfall that deposits enough  $^7\text{Be}$  evenly on the soil, followed by an important erosive event generating soil redistribution. This limitation has suggested the need to refine the original  $^7\text{Be}$  method to study soil redistribution using this cosmogenic radionuclide in areas with frequent erosive rainfall like in south Chile. This modification is presently undertaken.

The investigation shows that soil redistribution is more affected by the slope angle than the slope length. The better spacing among trash barriers in slopes of about 29% ranges between 10 and 15 m. Considering practical reasons during the construction of trash barriers a 15 m spacing is recommended, what coincides with those evidenced during year 2006.

Key words: erosion, sedimentation, clearcutting, woody trash barriers,  $^7\text{Be}$ , erosion pins.

## Anexo 2

Formulario de terreno

Cuadro 1. Formulario para registro de la longitud expuesta de clavos en la parcela RD 10.

Dist. (m)	Ruma Desechos 10			
	A		B	
0	1,1	X.1	1,1	
	1,2	X.2	1,2	
	1,3	X.3	1,3	
1,7	2,1		2,1	
	2,2		2,2	
	2,3		2,3	
3,3	3,1		3,1	
	3,2		3,2	
	3,3		3,3	
5	4,1		4,1	
	4,2		4,2	
	4,3		4,3	
6,7	5,1		5,1	
	5,2		5,2	
	5,3		5,3	
8,3	6,1		6,1	
	6,2		6,2	
	6,3		6,3	
10	7,1		7,1	
	7,2		7,2	
	7,3		7,3	

**X.1 = Clavo superior**

**X.2 = Clavo inferior izquierdo**

**X.3 = Clavo inferior derecho**

### Anexo 3

Gráficos de doble tendencia de mediciones efectuadas con pluviógrafos

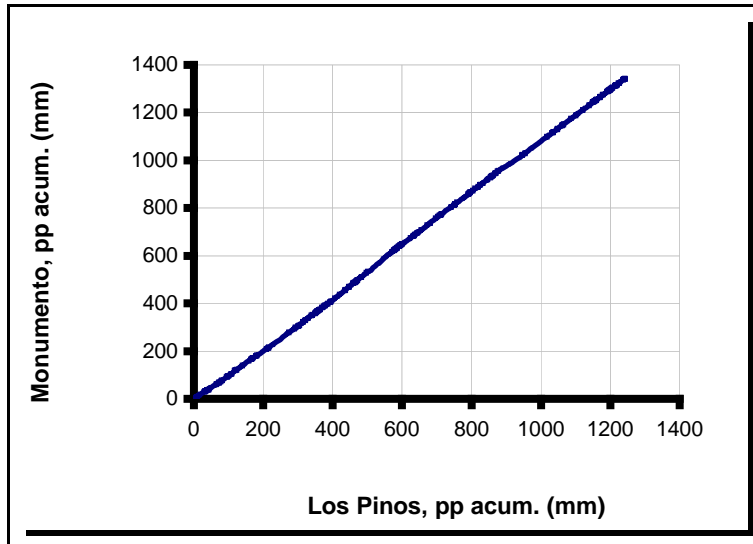


Figura 1. Precipitación diaria pluviógrafo Monumento vs Los Pinos

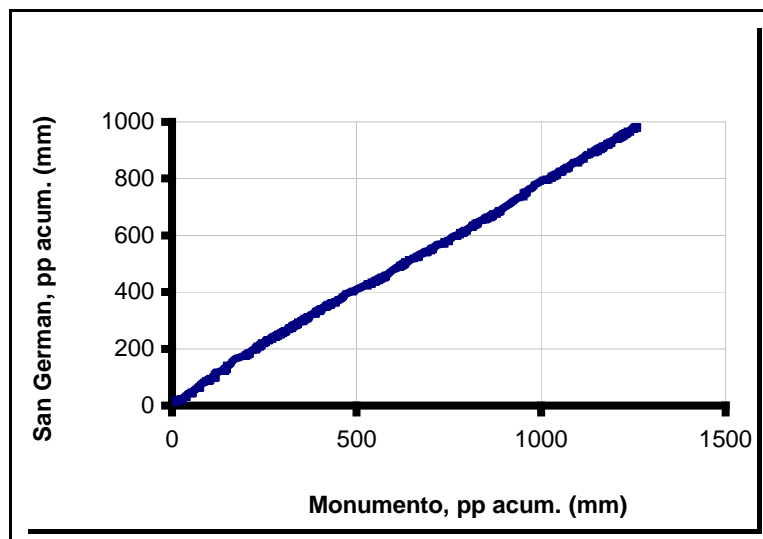


Figura 2. Precipitación diaria, pluviógrafo San Germán vs Monumento

## Anexo 4

Resultados de redistribución acumulada de suelo utilizando el método de clavos de erosión

Cuadro 2. Redistribución acumulada para la parcela RD10.

Periodos de medición año 2007	01mar - 02 abr	01mar - 25abr	01mar - 01jun	01mar - 03jul	01mar - 01ago	01mar - 07sep	01mar - 02 Oct	01mar - 30 Oct
Erosión media (t ha <sup>-1</sup> )	17	7	15,3	14	12,6	11,7	25,9	6,9
Fracción de área erosionada (%)	46	25	42	54	25	46	67	42
Sedimentación media (t ha <sup>-1</sup> )	22,3	21,5	23,1	41,8	25,2	47,6	78,4	45,7
Fracción de área sedimentada (%)	38	75	58	46	75	54	33	58
Erosión neta (t ha <sup>-1</sup> )								
Fracción de sedimentos movilizados (%)								
Sedimentación neta (t ha <sup>-1</sup> )	0,6	10,7	7,1	11,6	15,8	20,5	8,9	23,8

Cuadro 3. Redistribución acumulada para la parcela RD15

Periodos de medición año 2007	01mar - 02 abr	01mar - 25abr	01mar - 01jun	01mar - 03jul	01mar - 01ago	01mar - 07sep	01mar - 02 Oct	01mar - 30 Oct
Erosión media (t ha <sup>-1</sup> )	11,9	8,2	11,1	16,3	9,9	14,2	26,9	12,2
Fracción de área erosionada (%)	75	36	64	64	47	50	64	33
Sedimentación media (t ha <sup>-1</sup> )	26,4	28,9	51,4	58,9	34	50,6	73,5	52,5
Fracción de área sedimentada (%)	19	58	31	31	53	44	36	50
Erosión neta (t ha <sup>-1</sup> )	3,8							
Fracción de sedimentos movilizados (%)	0,04							
Sedimentación neta (t ha <sup>-1</sup> )		13,9	8,6	7,6	13,3	15,4	9,4	22,8

Cuadro 4. Redistribución acumulada para la parcela RD18

Periodos de medición año 2007	01mar - 02 abr	01mar - 25abr	01mar - 01jun	01mar - 03jul	01mar - 01ago	01mar - 07sep	01mar - 02 Oct	01mar - 30 Oct
Erosión media (t ha <sup>-1</sup> )	15,7	18,2	23,2	22,4	21,1	17,9	33,6	17,2
Fracción de área erosionada (%)	50	47	42	36	31	36	36	42
Sedimentación media (t ha <sup>-1</sup> )	32,5	27,9	35,6	59,2	44,6	69,8	98,3	81,9
Fracción de área sedimentada (%)	50	53	53	58	64	64	53	58
Erosión neta (t ha <sup>-1</sup> )								
Fracción de sedimentos movilizados (%)								
Sedimentación neta (t ha <sup>-1</sup> )	8,4	6,1	9,2	26,5	22,1	38,1	39,8	40,6

Cuadro 5. Redistribución acumulada para la parcela RD30

Periodos de medición año 2007	01mar - 02 abr	01mar - 25abr	01mar - 01jun	01mar - 03jul	01mar - 01ago	01mar - 07sep	01mar - 02 Oct	01mar - 30 Oct
Erosión media (t ha <sup>-1</sup> )	15,4	19,9	19,7	23,4	12,4	26,8	24,6	13,9
Fracción de área erosionada (%)	53	32	65	51	47	56	47	58
Sedimentación media (t ha <sup>-1</sup> )	37,3	34,8	44,4	45,1	38,4	65,3	72,7	80,5
Fracción de área sedimentada (%)	44	60	35	49	50	42	53	42
Erosión neta (t ha <sup>-1</sup> )								
Fracción de sedimentos movilizados (%)								
Sedimentación neta (t ha <sup>-1</sup> )	8,4	14,4	2,6	9,9	13,3	12,3	26,8	25,4



## Anexo 5

### Análisis estadístico

Cuadro 6. Estadísticos descriptivos de la redistribución neta acumulada ( $t\ ha^{-1}$ ) para cada una de las parcelas

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
10	8	12,350	7,4640	2,6389	6,110	18,590	,6	23,8
15	8	10,809	7,5296	2,6621	4,514	17,104	-3,8	22,2
18	8	23,841	14,7233	5,2055	11,532	36,150	6,1	40,6
30	8	14,153	8,2385	2,9127	7,266	21,041	2,6	26,8
Total	32	15,288	10,7830	1,9062	11,401	19,176	-3,8	40,6

Cuadro 7. Prueba de homogeneidad de varianzas para R neta acumulada ( $t\ ha^{-1}$ )

Estadístico de Levene	Gl1	gl2	Sig.
3,304	3	28	,035

Cuadro 8. Análisis de varianza ANOVA para R neta acumulada ( $t\ ha^{-1}$ )

	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	825,062	3	275,021	2,771	,060
Intra-grupos	2779,377	28	99,263		
Total	3604,438	31			

Cuadro 9. Pruebas post hoc, Comparaciones múltiples, donde la variable dependiente es R neta acumulada ( $t\ ha^{-1}$ )

(I) Parcela RD	(J) Parcela RD	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
10	15	1,5413	4,9816	,759	-8,663	11,746
	18	-11,4907(*)	4,9816	,029	-21,695	-1,286
	30	-1,8028	4,9816	,720	-12,007	8,401
15	10	-1,5413	4,9816	,759	-11,746	8,663
	18	-13,0320(*)	4,9816	,014	-23,236	-2,828
	30	-3,3441	4,9816	,508	-13,548	6,860
18	10	11,4907(*)	4,9816	,029	1,286	21,695
	15	13,0320(*)	4,9816	,014	2,828	23,236
	30	9,6878	4,9816	,062	-,516	19,892
30	10	1,8028	4,9816	,720	-8,401	12,007
	15	3,3441	4,9816	,508	-6,860	13,548
	18	-9,6878	4,9816	,062	-19,892	,516

\* La diferencia entre las medias es significativa al nivel .05.

Cuadro 10. Estadísticos descriptivos de la R neta mensual ( $t\ ha^{-1}$ ) para cada una de las parcelas

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
10	8	2,765	11,2739	3,9859	-6,660	12,190	-15,8	17,1
15	8	2,375	10,0312	3,5466	-6,011	10,762	-9,2	16,4
18	8	5,299	7,5977	2,6862	-1,053	11,651	-6,2	16,8
30	8	3,172	8,7129	3,0805	-4,112	10,456	-14,8	11,9
Total	32	3,403	9,1059	1,6097	,120	6,686	-15,8	17,1

Cuadro 11. Prueba de homogeneidad de varianzas para R neta mensual ( $t\ ha^{-1}$ )

Estadístico de Levene	Gl1	gl2	Sig.
,460	3	28	,712

Cuadro 12. Análisis de varianza ANOVA para R neta mensual ( $t\ ha^{-1}$ )

	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	40,901	3	13,634	,151	,928
Intra-grupos	2529,552	28	90,341		
Total	2570,453	31			

Cuadro 13. Pruebas post hoc, Comparaciones múltiples, donde la variable dependiente es R. neta mensual ( $t\ ha^{-1}$ )

(I) Parcela RD	(J) Parcela RD	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
10	15	,3894	4,7524	,935	-9,345	10,124
	18	-2,5345	4,7524	,598	-12,269	7,200
	30	-,4071	4,7524	,932	-10,142	9,328
15	10	-,3894	4,7524	,935	-10,124	9,345
	18	-2,9239	4,7524	,543	-12,659	6,811
	30	-,7964	4,7524	,868	-10,531	8,938
18	10	2,5345	4,7524	,598	-7,200	12,269
	15	2,9239	4,7524	,543	-6,811	12,659
	30	2,1274	4,7524	,658	-7,607	11,862
30	10	,4071	4,7524	,932	-9,328	10,142
	15	,7964	4,7524	,868	-8,938	10,531
	18	-2,1274	4,7524	,658	-11,862	7,607

Cuadro 14. Estadísticos descriptivos de la R neta mensual ( $t\ ha^{-1}$ ) para la comparación entre parcelas P y RD.

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
P15	9	,9233	4,74416	1,58139	-2,7233	4,5700	-6,18	8,02
P30	9	-2,8667	2,79432	,93144	-5,0146	-,7188	-8,71	2,08
RD10	8	2,7647	11,27390	3,98593	-6,6605	12,1899	-15,80	17,08
RD15	8	2,3753	10,03116	3,54655	-6,0109	10,7616	-9,20	16,45
RD18	8	5,2992	7,59766	2,68618	-1,0526	11,6510	-6,20	16,83
RD30	8	3,1718	8,71293	3,08049	-4,1124	10,4560	-14,79	11,90
Total	50	1,8280	7,95146	1,12451	-,4318	4,0878	-15,80	17,08

Cuadro 15. Análisis de varianza ANOVA para R neta mensual ( $t\ ha^{-1}$ ) entre parcelas P y RD.

	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	325,982	5	65,196	1,035	,409
Intra-grupos	2772,074	44	63,002		
Total	3098,057	49			

Cuadro 16. Pruebas post hoc, Comparaciones múltiples, donde la variable dependiente es R neta mensual ( $t\ ha^{-1}$ ), para parcelas P y RD.

(I) parcelas	(J) parcelas	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
P15	P30	3,79000	3,74171	,317	-3,7509	11,3309
	RD10	-1,84139	3,85686	,635	-9,6144	5,9316
	RD15	-1,45201	3,85686	,708	-9,2250	6,3210
	RD18	-4,37590	3,85686	,263	-12,1489	3,3971
	RD30	-2,24845	3,85686	,563	-10,0214	5,5246
P30	P15	-3,79000	3,74171	,317	-11,3309	3,7509
	RD10	-5,63139	3,85686	,151	-13,4044	2,1416
	RD15	-5,24201	3,85686	,181	-13,0150	2,5310
	RD18	-8,16590(*)	3,85686	,040	-15,9389	-,3929
	RD30	-6,03845	3,85686	,125	-13,8114	1,7346
RD10	P15	1,84139	3,85686	,635	-5,9316	9,6144
	P30	5,63139	3,85686	,151	-2,1416	13,4044
	RD15	,38937	3,96868	,922	-7,6090	8,3877
	RD18	-2,53451	3,96868	,526	-10,5329	5,4638
	RD30	-,40706	3,96868	,919	-8,4054	7,5913
RD15	P15	1,45201	3,85686	,708	-6,3210	9,2250
	P30	5,24201	3,85686	,181	-2,5310	13,0150
	RD10	-,38937	3,96868	,922	-8,3877	7,6090
	RD18	-2,92388	3,96868	,465	-10,9222	5,0745
	RD30	-,79643	3,96868	,842	-8,7948	7,2019
RD18	P15	4,37590	3,85686	,263	-3,3971	12,1489
	P30	8,16590(*)	3,85686	,040	,3929	15,9389
	RD10	2,53451	3,96868	,526	-5,4638	10,5329
	RD15	2,92388	3,96868	,465	-5,0745	10,9222
	RD30	2,12745	3,96868	,595	-5,8709	10,1258
RD30	P15	2,24845	3,85686	,563	-5,5246	10,0214
	P30	6,03845	3,85686	,125	-1,7346	13,8114
	RD10	,40706	3,96868	,919	-7,5913	8,4054
	RD15	,79643	3,96868	,842	-7,2019	8,7948
	RD18	-2,12745	3,96868	,595	-10,1258	5,8709

\* La diferencia entre las medias es significativa al nivel .05.

Cuadro 17. Pruebas post hoc, Comparaciones múltiples, donde la variable dependiente es R neta acumulada ( $t\ ha^{-1}$ ), para parcelas P y RD.

(I) Parcelas	(J) Parcelas	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
P15	P30	***	***	,210	***	***
	RD10	***	***	,000	***	***
	RD15	***	***	,002	***	***
	RD18	***	***	,144	***	***
	RD30	***	***	,427	***	***
P30	P15	***	***	,210	***	***
	RD10	***	***	,000	***	***
	RD15	***	***	,000	***	***
	RD18	***	***	,010	***	***
	RD30	***	***	,051	***	***
RD10	P15	***	***	,000	***	***
	P30	***	***	,000	***	***
	RD15	***	***	,640	***	***
	RD18	***	***	,037	***	***
	RD30	***	***	,007	***	***
RD15	P15	***	***	,002	***	***
	P30	***	***	,000	***	***
	RD10	***	***	,640	***	***
	RD18	***	***	,099	***	***
	RD30	***	***	,024	***	***
RD18	P15	***	***	,144	***	***
	P30	***	***	,010	***	***
	RD10	***	***	,037	***	***
	RD15	***	***	,099	***	***
	RD30	***	***	,519	***	***
RD30	P15	***	***	,427	***	***
	P30	***	***	,051	***	***
	RD10	***	***	,007	***	***
	RD15	***	***	,024	***	***
	RD18	***	***	,519	***	***

\* La diferencia entre las medias es significativa al nivel .05.

Cuadro 18. Estadísticos descriptivos de la comparación entre el método de  $^{7}\text{Be}$  y clavos de erosión para la parcela RD10.

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
$^{7}\text{Be}$	14	,370	,3892	,1040	,145	,595	-,3	1,2
Clavos.01-06 al 01-08	14	1,667	3,8801	1,0370	-,574	3,907	-1,0	14,8
Clavos.03-07 al 01-08	14	,945	1,0226	,2733	,355	1,536	-1,4	2,5
Total	42	,994	2,3327	,3599	,267	1,721	-1,4	14,8

Cuadro 19. Análisis de varianza ANOVA de la comparación entre el método de  $^{7}\text{Be}$  y clavos de erosión para la parcela RD10.

	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	11,814	2	5,907	1,090	,346
Intra-grupos	211,281	39	5,417		
Total	223,095	41			

Cuadro 20. Pruebas post hoc, Comparaciones múltiples, entre el método de  $^{7}\text{Be}$  y clavos de erosión para la parcela RD10.

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
$^{7}\text{Be}$	2	-1,2964	,8797	,149	-3,076	,483
	3	-,5751	,8797	,517	-2,354	1,204
2	$^{7}\text{Be}$	1,2964	,8797	,149	-,483	3,076
	3	,7213	,8797	,417	-1,058	2,501
3	$^{7}\text{Be}$	,5751	,8797	,517	-1,204	2,354
	2	-,7213	,8797	,417	-2,501	1,058

2= Clavos.01-06 al 01-08

3= Clavos.03-07 al 01-08

Cuadro 21. Estadísticos descriptivos de la comparación entre el método de  $^7\text{Be}$  y clavos de erosión para la parcela RD15

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
$^7\text{Be}$	20	,286	,4795	,1072	,062	,511	-,4	1,7
Clavos.01-06 al 01-08	20	,947	1,3365	,2988	,322	1,573	-1,4	4,6
Clavos.03-07 al 01-08	20	,904	1,1712	,2619	,356	1,452	-2,5	2,7
Total	60	,712	1,0880	,1405	,431	,993	-2,5	4,6

Cuadro 22. Análisis de varianza ANOVA de la comparación entre el método de  $^7\text{Be}$  y clavos de erosión para la parcela RD15.

	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	5,468	2	2,734	2,421	,098
Intra-grupos	64,369	57	1,129		
Total	69,837	59			

Cuadro 23. Pruebas post hoc, Comparaciones múltiples, entre el método de  $^7\text{Be}$  y clavos de erosión para la parcela RD15.

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
$^7\text{Be}$	2	-,6611	,3360	,054	-1,334	,012
	3	-,6175	,3360	,071	-1,290	,055
2	$^7\text{Be}$	,6611	,3360	,054	-,012	1,334
	3	,0436	,3360	,897	-,629	,717
3	$^7\text{Be}$	,6175	,3360	,071	-,055	1,290
	2	-,0436	,3360	,897	-,717	,629

2= Clavos.01-06 al 01-08

3= Clavos.03-07 al 01-08



Cuadro 24. Estadísticos descriptivos de la comparación entre el método de  $^7\text{Be}$  y clavos de erosión para la parcela RD18

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
$^7\text{Be}$	24	***	***	***	***	***	***	***
Clavos.01-06 al 01-08	20	***	***	***	***	***	***	***
Clavos.03-07 al 01-08	20	***	***	***	***	***	***	***
Total	64	***	***	***	***	***	***	***

Cuadro 25. Análisis de varianza ANOVA de la comparación entre el método de  $^7\text{Be}$  y clavos de erosión para la parcela RD18.

	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	141,017	2	70,509	2,897	,063
Intra-grupos	1484,828	61	24,341		
Total	1625,845	63			

Cuadro 26. Pruebas post hoc, Comparaciones múltiples, entre el método de  $^7\text{Be}$  y clavos de erosión para la parcela RD18.

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	2	***	***	,057	***	***
	3	***	***	,696	***	***
2	1	***	***	,057	***	***
	3	***	***	,029	***	***
3	1	***	***	,696	***	***
	2	***	***	,029	***	***

\* La diferencia entre las medias es significativa al nivel .05.

2= Clavos.01-06 al 01-08

3= Clavos.03-07 al 01-08

## Anexo 6

Análisis de suelo Monumento y San Germán

Cuadro 27. Análisis de granulométrico para el sitio Monumento y San Germán

Sitio	arcilla	limo	arena	Textura
Referencia ( $A_{ref}$ ) Monumento	35,7	52,3	12	Franco arcilloso limoso
Parcelas P Monumento	40,3	49	10,7	Arcilloso limoso
Referencia ( $A_{ref}$ ) S. Germán	21,3	70	8,7	Franco limoso
Parcelas RD S. Germán	35,1	56,4	8,5	Franco arcilloso limoso

Cuadro 28. Análisis físico y químico del suelo.

Sitio	Densidad Aparente ( $\text{g/cm}^3$ )	Carbono total (%)
Referencia ( $A_{ref}$ ) Monumento	0,45	13,5
Parcelas P Monumento	0,63	9,3
Referencia ( $A_{ref}$ ) S. Germán	0,71	10,9
Parcelas RD S. Germán	0,58	9,5

## Anexo 7

Redistribución de suelo ( $t\ ha^{-1}$ ) entre RD utilizando el método de  $^7Be$  y clavos de erosión

Cuadro 29. Redistribución de suelo ( $t\ ha^{-1}$ ) en cada punto de los transectos de pendiente de RD10 para método de  $^7Be$  y clavos de erosión

$^7Be$		Clavos de erosión	
-0,6	5,6	19,2	-5,2
2,2	4,8	-10,4	8,7
5,8	0,7	0,00	17,4
3,4	3,7	13,9	15,7
6,4	-3,4	3,5	3,5
1	2,1	3,5	13,9
8,1	12,1	148,0	1,7

Cuadro 30. Redistribución de suelo ( $t\ ha^{-1}$ ) en cada punto de los transectos de pendiente de RD15 para método de  $^7Be$  y clavos de erosión

$^7Be$		Clavos de erosión	
-2,6	3,8	17,7	-1,8
4,9	-2	7,1	-14,2
3,2	0,4	10,6	12,4
-0,6	2,4	1,8	0,00
2,3	2,5	-1,8	23
-0,5	2,4	8,9	7,1
3,3	3,7	-1,8	7,1
4,4	-0,2	1,8	14,2
-2	3,4	12,4	5,3
17,2	12,4	33,6	46

Cuadro 31. Redistribución de suelo ( $t\ ha^{-1}$ ) en cada punto de los transectos de pendiente de RD18 para método de  $^7Be$  y clavos de erosión

$^7Be$		Clavos de erosión	
2,4	-2,4		
3,8	8,7		
2	15,8	6,7	44,9
7,9	12,6	20,2	2,2
7,7	6,3	-6,7	-6,7
3,7	5,6	4,5	2,2
9,7	1,4	33,7	22,4
6	10,8	24,7	9
2,5	3	-6,7	-6,7
7,4	1,1	17,9	9
5,7	2,4	6,7	6,7
22,3	42	184,0	358,9