



Monografías CANALES DE DESVIACIÓN DE AGUAS LLUVIAS

**Roberto Pizarro Tapia
Juan Pablo Flores Villanelo
Claudia Sangüesa Pool
Enzo Martínez Araya
Leonardo Román Arellano**

Monografías

CANALES DE DESVIACIÓN DE AGUAS LLUVIAS

PROYECTO FDI - CORFO

**Determinación de Estándares de Ingeniería en Obras de
Conservación y Aprovechamiento de Aguas y Suelos,
para la Mantención e Incremento de la Productividad Silvícola.**

**Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda.,
está conformada por:**

**Universidad de Talca
Bosques de Chile S.A.
Terranova S.A.
Bosques Villanueva Ltda.**

Instituciones asociadas:

**Instituto Forestal (INFOR)
Banestado Microempresas S.A.
Corporación Nacional Forestal (CONAF)
Dirección General de Aguas (DGA)
Forestal Celco S.A.
Prodecop - Secano
Universidad Politécnica de Madrid**

Registro de Propiedad Intelectual N° 145214

ISBN 956-299-566-9

Talca, Chile, Diciembre 2004

Diseño de Portada
Marcela Albornoz Dachelet

Diagramación
Mabel Urrutia Olave

Corrección de textos
Cristián Jordán Díaz

Impresora Contacto Ltda.
Impreso en Chile

Índice

	Pág.
Conceptos previos de la conservación de aguas y suelos	5
Experiencias asociadas a la construcción de obras de conservación de aguas y suelos	7
Los canales de desviación de aguas lluvias	9
Diseño hidrológico de un canal	11
Proyecto EIAS - Chile	13
Consideraciones finales	25
Referencias bibliográficas	27
Anexos	29

Conceptos previos de la conservación aguas de suelos

En Chile existe una gran cantidad de áreas degradadas, las cuales según Francke (1996), alcanzan alrededor de 11,5 millones de hectáreas, las que son principalmente producto de una mala utilización del recurso suelo. Así por ejemplo, la deforestación masiva con el fin de habilitar terrenos agrícolas, los incendios forestales, las técnicas inadecuadas de labranza como cultivos en zonas con mucha pendiente, exposiciones demasiado extensas en el tiempo del suelo desnudo (barbecho), los riegos inadecuados y factores de índole social o económico, constituyen causas importantes de degradación de este recurso (Gallardo, 1994).

Un gran problema de estas áreas tiene relación con los recursos hídricos, debido a que la pérdida de la cobertura vegetal genera que el horizonte edáfico se vea fuertemente erosionado por la escorrentía superficial, sobre todo si existen laderas muy pronunciadas. Esto conlleva a la disminución de la infiltración, un aumento de la erosión, y todo ello en desmedro de la productividad de los sitios, al no contar la vegetación con humedad y nutrientes suficientes, en especial en áreas con fuertes pendientes y zonas con presencia de cárcavas.

Por esta razón, se hace necesario diseñar y calcular las obras de ingeniería de recolección de agua, a nivel de ladera o cauce. Sin embargo, este trabajo resulta ser muy costoso en sectores con economías de subsistencia, por lo que se enfrenta un esquema de trabajo que exige una optimización de las posibilidades de protección del agua, derivado de que ésta ofrece las mayores potencialidades de desarrollo productivo, especialmente, en zonas áridas y semiáridas.

A la hora de realizar obras de conservación de suelos, se debe considerar el grado de erosión que alcanza un determinado sector; para ello la Corporación Nacional Forestal (CONAF) clasifica la erosión en 3 niveles: moderada, severa y muy severa. En este sentido, la conservación del suelo se asocia y frecuentemente se identifica con el control de la erosión. Pero es mucho más, es la integración de todo lo relacionado con el uso racional del suelo y su tratamiento (Carlson, 1990).

Así por ejemplo, en Chile la conservación de suelos se refiere al uso y manejo del recurso, a fin de mantener y/o manejar su capacidad productiva, en función de sus aptitudes, limitaciones y potencialidades, de manera de evitar su pérdida y/o degradación, para el beneficio de las generaciones presentes y futuras (CONAMA, 1994).

En el mismo marco, los métodos de conservación del suelo son múltiples y podría decirse que cada uno de ellos se acomoda a cada caso en particular. Sin embargo, se pueden establecer algunas divisiones que responden muy bien a la forma de llevarlos a cabo y las técnicas empleadas, a saber, métodos biológicos y métodos mecánicos de conservación (Peralta, 1976).

Así, se puede establecer la siguiente clasificación, entre las obras de conservación de aguas y suelos, más utilizadas en Chile:

Prácticas Mecánico-estructurales

- Diques (mampostería, transversales de madera, roca pesada, estructuras gavionadas, concreto ciclópeo)
- Muros de contención y/o sostenimiento
- Canales de desviación
- Terrazas de captación
- Drenes subterráneos
- Colectores de aguas lluvias

Prácticas Agronómicas-culturales

- Surcos en contorno
- Subsulado

- Fajas de contención
- Terrazas

Prácticas Hidrológico-forestales

- Zanjas de infiltración
- Diques de polines impregnados
- Canales de evacuación de aguas lluvias (en tierra sin revestimiento)
- Empalizadas y/o ordenamiento de desechos en fajas

El presente documento presenta una revisión de los principales elementos y parámetros técnicos para un canal de evacuación de aguas lluvias, como una opción tecnológica para sectores con grandes problemas de erosión, como son el control de cárcavas. Igualmente, se realiza una revisión del Proyecto EIAS «Determinación de estándares en obras de ingeniería para aguas y suelos, para la mantención o incremento de la productividad silvícola», el que incorpora una evaluación del diseño y construcción de dos canales de desviación para el control de cárcavas en el secano costero e interior de Chile central.

Experiencias asociadas a la construcción de obras de conservación de aguas y suelos

A partir de la década de los noventa, en Chile, se han llevado a cabo diversas experiencias de desarrollo e investigación en la temática de la conservación y aprovechamiento de aguas y suelos. La Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda., publicó en el año 2004, el libro «Revisión y análisis de prácticas tradicionales de conservación de aguas y suelos en zonas áridas y semiáridas de Chile central», que contiene una revisión exhaustiva de diversas y numerosas experiencias nacionales sobre la construcción de canales de desviación de aguas lluvias, realizadas entre las regiones IV y VIII, para el período comprendido entre 1975 y 2002. Así también, cabe mencionar que la mayoría de éstas, se concentran con posterioridad al año 1997, dada la vigencia de las bonificaciones establecidas en la ley 19.561, para la recuperación y conservación de suelos degradados. En este ejemplar, se detallan los costos y rendimientos de la construcción de los canales de desviación de aguas lluvias, que fueron recopilados entre la Región de Coquimbo y la Región del Bío-Bío, y que fueron ejecutadas en su gran mayoría por CONAF (Pizarro *et al*, 2004).

Por otra parte, cabe consignar los esfuerzos de otras instituciones gubernamentales, entre ellas, el Instituto Forestal (INFOR), el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), el Centro de Información de los Recursos Naturales (CIREN), la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), y las acciones de las Universidades públicas y privadas, a partir de la ejecución de numerosos proyectos de investigación, con financiamiento en su mayoría estatal, que han permitido contribuir al conocimiento de los procesos erosivos, y su control y mitigación en las actividades agrícolas y forestales.

En este contexto, se puede destacar la ejecución de los programas de incentivos para suelos degradados, establecido en el D.L. 701 (modificado por la Ley 19.561, CONAF) y el DFL 235 de 1999, (SAG-INDAP), que tienen como propósito detener o revertir los procesos de erosión de los suelos, producto del uso intensivo o de la aplicación de tecnologías inapropiadas de explotación

A pesar de las diversas y numerosas experiencias desarrolladas en Chile, éstas no han permitido establecer estándares hidrológicos con ingeniería de diseño, que posibiliten una mayor productividad del suelo y una mejor decisión técnica y económica, con respecto a la elección del tipo de obra a implementar en una determinada situación y la rentabilidad económica de las mismas. Esto, debido a que carecen de un diseño objetivo que incorpore variables ambientales importantes como lo son la intensidad de la precipitación, o la geomorfología del terreno, entre otras. Así, se desconoce por ejemplo, cuál es la distancia óptima entre zanjas o líneas de subsolado, o el tamaño de los canales de evacuación y de las zanjas, variables íntimamente relacionadas con la frecuencia e intensidad de las precipitaciones que ocurren en el lugar de tratamiento y con la pendiente del terreno.

Los canales de desviación de aguas lluvias

Los canales de desviación (o evacuación) de aguas lluvias son estructuras destinadas a conducir el exceso de aguas de escurrimiento, desde zonas afectadas por la erosión hasta áreas protegidas y/o de baja pendiente, disminuyendo el escurrimiento superficial de las laderas, favoreciendo además la infiltración del agua. Una desventaja que presenta esta práctica es su alto costo, además de tener limitaciones de pendiente



Estas obras son construidas en laderas y tienen por objetivo, capturar y evacuar las aguas de escorrentía hacia una zona en la cual estas puedan ser vertidas, minimizando el daño ambiental (Fotografía 1). Son muy útiles para evitar los procesos erosivos en cárcavas y el desgaste creciente del espesor del suelo por efecto de la escorrentía superficial, debido a que permiten cortar la lámina de escurrido y debilitar la energía cinética del agua. Sin embargo, esto determina que el canal debe poseer características importantes de ingeniería de diseño, dado que debe transformar la energía no controlada de agua de escorrentía, en una energía controlada que se deposita en un área más protegida, como lo es una quebrada o un dren natural

Fotografía 1. Canal de desviación
Comuna de Cauquenes, VII Región

Los canales de evacuación actúan disminuyendo el escurrimiento superficial del área de cárcavas activas y disipando el agua retenida hacia las laderas estabilizadas.

La escorrentía que deberá recibir un canal de evacuación depende de diversos factores:

- La máxima intensidad de lluvia que pueda ocurrir en un periodo y tiempo determinado
- Características de la zona vertiente, tales como la pendiente, la cubierta vegetal existente en el sector, el suelo y sus características de textura e infiltración, entre otras.
- Extensión de la ladera, variable que está directamente asociada al área de impluvio, es decir al área aportante de escorrentía superficial al canal de evacuación.

Vargas *et al* (1998), mencionan cuatro tipos de canales dentro de las obras de conservación de aguas y suelos, los cuales varían en sus dimensiones y objetivos, pero todos siguiendo patrones de construcción muy similares. Estos son:

- Canal de desviación o de difusión de aguas.
- Canal longitudinal de sacos de tierra
- Canal transversal simple
- Canal transversal compuesto

Por otra parte, los canales de desviación, deben responder a consideraciones hidráulicas e hidrológicas. Así por ejemplo, si se tiene un canal de sección trapezoidal (Figura 1) o de sección rectangular, el diseño óptimo indica que el radio hidráulico debe igualarse a la altura o tirante del canal dividido por dos, es decir, $R = h/2$ (Pizarro, 1988).

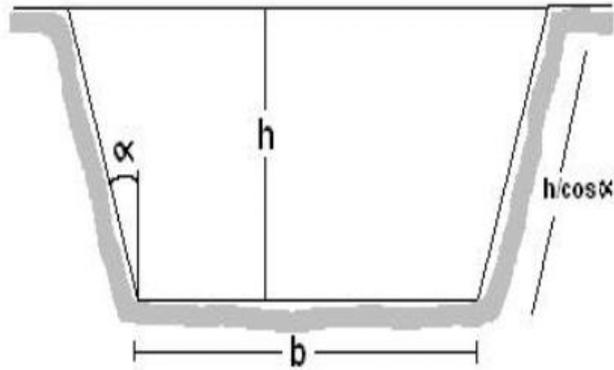


Figura 1. Configuración de un canal de desviación aguas lluvias

Según CONAF, el canal de desviación es una obra de recuperación de suelos, manual o mecanizada, que se sitúa preferentemente en la parte superior o media de la ladera para capturar la escorrentía procedente de las cotas superiores. Se construye transversalmente a la pendiente con un ligero desnivel (1%) para transportar el agua a una salida estabilizada. Presenta una sección con un ancho mínimo en la base de 0,2 m y una altura efectiva mínima de 0,2 m. Las dimensiones deben permitir evacuar un volumen de agua según la precipitación de diseño. Aguas abajo, adyacente a la excavación, se construye un camellón de altura y ancho similares a la profundidad del canal y a la anchura superior de la obra, respectivamente. El largo máximo es de 100 m. Las aguas del canal siempre deben evacuar en un área receptora estabilizada.

Diseño hidrológico de un canal

El diseño de un canal de desviación no sólo debe contemplar el análisis hidrológico e hidráulico de la configuración geométrica y el trazado topográfico de la obra, sino también requiere del conocimiento de las condiciones de relieve, edáficas y de composición vegetal del sector, para lo cual se hace necesario realizar visitas de terreno y establecer un emplazamiento preliminar del canal (fotografía 2). Un elemento primordial antes de comenzar un proyecto de estas características, es la definición de la forma de la sección transversal del canal. Como ya se sabe, estas obras involucran un alto costo de construcción, para lo cual, se recomienda una configuración trapezoidal, que permite optimizar el diseño y los recursos financieros del usuario.

En este marco, el diseño y construcción del canal de desviación de aguas lluvias (Pizarro *et al*, 2004), está basado en el análisis metodológico de la ecuación racional y la ecuación de Manning, lo que se resume en:



Fotografía 2. Canal de evacuación de aguas lluvias, (protección ciudadana) Comuna de Coelemu, VIII Región

- a. Determinación del caudal a conducir
- b. Determinación de la intensidad de precipitación máxima de diseño (Curvas IDF)
- c. Cálculo del tiempo de concentración
- d. Cálculo de la sección del canal
- e. Cálculo de los parámetros hidráulicos

En otras palabras, el diseño de los canales de desviación o evacuación de aguas lluvias (Pizarro *et al*, 2004), son diseñados y construidos a partir de la utilización de cinco elementos edafoclimáticos fundamentales, a saber, el **coeficiente de escorrentía**, definido como la parte de la precipitación que se presenta en forma de flujo de agua en el suelo, (Chow *et al*, 1994); la **intensidad de precipitación máxima** para un lapso de 30 minutos; el **período de retorno**, definido como el tiempo que transcurre entre dos eventos de las mismas características; el **tiempo de concentración** de las aguas lluvias a un punto dado; y la **superficie de impluvio** de aguas lluvias, la cual aporta directamente el agua al canal, es decir, es la superficie que proporcionará el agua que será evacuada por la obra.

Proyecto EIAS - Chile

Como una forma de evaluar la efectividad de las técnicas de captación y aprovechamiento de aguas lluvias, para la protección del suelo, en zonas altamente degradadas, se llevó a cabo una investigación relacionada con el movimiento de suelo al interior de cárcavas, en función de la construcción de un canal de desviación. Esto permitió establecer estándares de construcción con la incorporación de un diseño hidráulico e hidrológico de un canal, como también medir y evaluar el avance del proceso erosión/sedimentación de dos cárcavas ubicadas en el secano costero e interior de Chile central, donde el régimen de precipitaciones, las condiciones de suelo y la cobertura vegetal, son generalmente condiciones desfavorables para una conservación y aprovechamiento de las aguas y los suelos con alguna aptitud agroforestal

Descripción de los Ensayos

Predio Fundo Lagunillas: Corresponde a un lomaje ubicado en la vertiente poniente de un cerro y que termina en un estero, con una pendiente media de 32%. El suelo está cubierto de herbáceas con un uso de pastoreo extensivo. En este ensayo se estudiará el diseño de un canal de desviación y su efecto se testimonió a través de una cárcava de aproximadamente 40 m de largo (Anexo I a).

Ensayo Llanillos: Este predio pertenece a Forestal Celco S.A. y el lugar de ensayo fue plantado en 1998 con pino insigne. Dicha plantación fue afectada por un incendio en diciembre de 2001, encontrándose un paisaje deteriorado. El ensayo se encuentra al lado de un camino interior, en la parte media de un cerro, con pendiente media de 27% y exposición noroeste. En este lugar se estudió el diseño de canales de desviación y su efecto se midió en 2 cárcavas aledañas (Anexo I b).

Estos sectores del secano interior y costero de Chile Central, respectivamente (cuadro 1), presentan una fuerte erosión, causada principalmente por las prácticas de agricultura tradicional, que durante cientos de años han empobrecido la calidad de los suelos. Entre las prácticas agrícolas que más afectan los suelos pueden mencionarse, entre otras, el establecimiento de los cultivos en terrenos con pendiente, el barbecho y la utilización del arado a favor de la pendiente (Morales y Uzón, 1995).

Cuadro 1. Ubicación geográfica (UTM) de los ensayos del proyecto EIAS

ENSAYO	NORTE	ESTE	ALTITUD (m.s.n.m.)	OBSERVACIONES
Llanillos	6093528.253 m	785158.111 m	485	Módulo canal de desviación
	6093543.333 m	785134.263 m	486	Instrumento pluviográfico
Paredones	6162921.857 m	230106.433 m	45	Módulo canal de desviación
	6161718.333 m	235385.892 m	53	Instrumento pluviográfico

Asimismo, las características físicas y químicas del suelo, se muestran en los cuadros 2 y 3.

Cuadro 2. Características físicas del suelo, en los ensayos de Paredones (VI Región) y Llanillos (VII Región)

ENSAYO	TEXTURA	DENSIDAD APARENTE	CAPACIDAD DE CAMPO	PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE
Llanillos	Franco arcilloso	1,32	24,24	13,63
Paredones	Arcillo arenoso	1,33	23,31	15,03

Cuadro 3. Características químicas del suelo, en los ensayos de Paredones (VI Región) y Llanillos (VII Región)

ENSAYO	N PPM	P PPM	K PPM	M.O. %	PH	C.E. DS/M	CA CMOL/KG	MG CMOL/KG	K CMOL/KG	NA CMOL/KG	B PPM
Llanillos	4	2	103	2,99	6,14	0,049	5,25	1,89	0,26	0,05	0,24
Paredones	3	4	65	3,11	6,65	0,040	7,07	4,25	0,17	0,08	0,80

Por otra parte, los resultados del diseño hidrológico, a partir de la ecuación racional y la ecuación de Manning (Cuadro 4), definieron para el canal de Paredones y el de Llanillos un largo de 226 y 103 metros, respectivamente, pudiéndose así evacuar las aguas lluvias sin provocar daños a otras zonas adyacentes de dicha cárcava. Las dimensiones de cada canal se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 4. Diseño hidrológico de los canales de desviación para los ensayos de Llanillos y Paredones

Parámetros Hidráulicos	Paredones	Llanillos
Coefficiente de escorrentía	0,70	0,70
Área de impluvio (m ²)	2,0	3,0
Velocidad (m/s)	0,9	0,9
Caudal (m ³ /s)	0,082	0,123

Cuadro 5. Dimensionamiento de los canales de desviación para los ensayos de Llanillos y Paredones

Dimensiones del canal de desviación	Paredones	Llanillos
Sección del canal (m ²)	0,091	0,137
Tirante (m)	0,229	0,281
Base de fondo (m)	0,265	0,324
Longitud de talud (m)	0,265	0,324
Ancho superior (m)	0,56*	0,68*
Pendiente (m/m)	0,016	0,012
Revancha (m)	0,03	0,03
Largo del canal (m)	226	103

Costos y rendimientos de construcción

Como parte de las recopilaciones de experiencias en la construcción de canales de desviación de aguas lluvias a nivel predial, el costo de construcción de un metro cúbico alcanza valores de 3.829 \$/m³, mientras que el rendimiento promedio en estos trabajos presenta una alta variabilidad, lo que estaría relacionada a la experiencia y eficiencia del operador forestal y a las condiciones de pendiente, la vegetación y las características geomorfológicas que presenta cada una de las localidades (Figura 2).



Sector	Año	Costo* (\$/m ³)	Rendimiento (m ³ /j)
Cuesta Cavilolén (IV)	1998	3.807	2,3
Cuesta Cavilolén (IV)	2001	3.340	2,3
El Sauce (IV)	1998	2.343	2,4
Sierras de Bellavista (VI)	2000	4.858	1,1
Prodecop - Secano (VI)	2000	3.953	1,5
Cabeceras (VI)	2000	2.705	2,0
Lagunillas (VI)	2002	5.100	1,6
El Hoyo (VII)	2000	6.230	3,1
Santa Sofía (VIII)	2002	2.129	5,9

* valores inflactados a marzo del 2003

m³/j: metro cúbico por jornal

Figura 2. Algunas experiencias con canales de evacuación de aguas lluvias en Chile central

Así también, el Proyecto FDI - CORFO «Determinación de estándares de ingeniería en obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos, para la mantención e incremento de la productividad silvícola en *Pinus radiata* (D. Don)», determinó algunos estándares de costo/rendimiento en los dos sectores presentados anteriormente (ver cuadro 6).

Cuadro 6. Resultados de costo/rendimiento de los canales de desviación de aguas lluvias

Ensayo	Paredones	Llanillos
Longitud de canal (m)	226	103
Volumen excavado (m ³)	23,8	15,8
Costo de construcción (\$/m ³)*	6.471	6.329
Costo de Construcción (\$/ml)	681	974
Rendimiento (m ³ /j)	1,19	1,13
Rendimiento (ml/j)	11,3	6,4

ml: metro lineal j: jornal

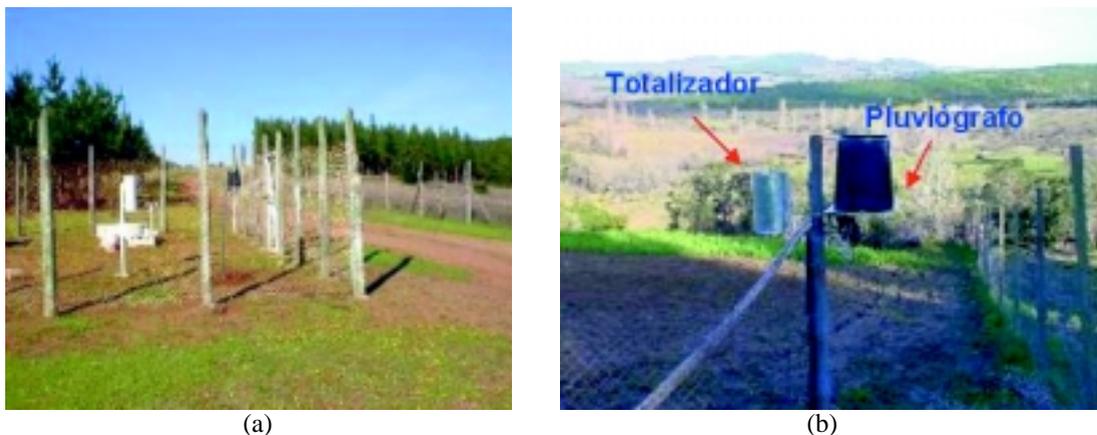
Así, la construcción de los canales en Paredones y Llanillos contempló la utilización de 4 - 5 trabajadores con un rendimiento de 1,19 y 1,13 m³/día, en un terreno de textura franco arenoso y franco arcilloso, más la presencia de sectores rocosos, lo que dificultó enormemente las labores de movimiento inicial de tierra. Asimismo, resta destacar que el alto grado de sedimentación en los dos sectores, a causa de la escasa cobertura vegetacional y la pronunciada pendiente, provocando que la sección teórica diseñada disminuya notoriamente, por lo que es necesario realizar a lo menos una vez al año la mantención y limpieza de la obra.

En este sentido, y en comparación a valores entregados por las experiencias nacionales (figura 1), los costos del proyecto EIAS son más elevados que los registrados en dichas experiencias. La razón se debe al mayor costo atribuido a la ingeniería de trazado y diseño hidrológico de esta obra, aún cuando, estos valores están por bajo a lo establecido en la tabla de costos elaborada por CONAF, correspondiente al programa de incentivos para la recuperación de suelos degradados (Ley 19.561). Por consiguiente, el diseño hidrológico e hidráulico resulta ser una opción tecnológica válida, al momento de tomar la deci-

sión de efectuar un canal de desviación en zonas altamente degradadas, como son las cárcavas ubicadas en predios con algún nivel de productividad agrícola y/o forestal.

En el proyecto EIAS, la medición, análisis y evaluación de un canal de desviación de aguas lluvias, para el control de avance de una cárcava, se llevó a cabo en los ensayos de Paredones y en el de Llanillos, con el propósito de determinar estándares de construcción para este tipo de obras, y su énfasis en el control de laderas y la retención de sedimentos. Este análisis fue desarrollado en función de la evaluación de variables edafoclimáticas del sector, el diseño hidrológico, la captura y análisis de la información pluviográfica y los elementos técnicos de construcción revisados en los apartados anteriores.

En el contexto descrito, para el análisis de la precipitación y la erosión hídrica del suelo, se debe implementar una estación pluviográfica. De lo contrario, se puede utilizar una estación de referencia, y extrapolar la información con la aplicación de las curvas IDF (Pizarro *et al.*, 2001).



Fotografía 3. (a) Equipo de Paredones, VI Región, para el registro de las precipitaciones
(b) Equipo de Name, VII Región, para la captura de datos pluviográficos

Un elemento fundamental para la captura periódica de datos de precipitación y el análisis temporal de los mismos, fue contar con un pluviógrafo digital (Fotografía 3), que permitió registrar y obtener la información pluviográfica requerida de los eventos de precipitaciones máximas en 1 y 24 horas, durante el periodo 2002-2004.

En el cuadro 7 se entrega una depuración de la información obtenida de forma acumulada, a eventos ocurridos para las estaciones emplazadas en esta investigación, con los registros máximos de precipitación en 1 y 24 horas, para los 2 equipos instalados entre los meses de agosto 2002 y diciembre del año 2004, de acuerdo a la fecha de ocurrencia.

Cuadro 7. Registros máximos de precipitación en 1 y 24 h. para los equipos utilizados en Paredones (VI Región) y Llanillos (VII Región)

	Registros máximos de precipitación en 1 h						Registros máximos de precipitación en 24 h					
	Paredones			Llanillos			Paredones			Llanillos		
	2002	2003	2004	2002	2003	2004	2002	2003	2004	2002	2003	2004
Enero	—	2,4	0,2	—	3,2	0	—	7,6	0,2	—	12,0	0
Febrero	—	0	0,2	—	0	1,4	—	0	0,2	—	0	2,8
Marzo	—	0,2	15,8	—	0,2	11	—	0,2	20,0	—	0,2	20,2
Abril	—	1,0	12,0	—	5,2	5,6	—	1,6	28,6	—	5,4	38,2
Mayo	—	6,8	5,8	—	15,2	3,4	—	51,2	13,2	—	74,0	16,2
Junio	—	6,2	9,6	—	18,6	6,8	—	34,4	34,0	—	42,0	35,8
Julio	—	22	6,8	—	7,0	7,0	—	39,2	33,4	—	42,2	40,6
Agosto	5,0	5,0	4,4	6,2	3,6	12,0	28,8	14,8	24,8	58,0	16,8	58,4
Septiembre	4,6	3,0	4,8	8,8	5,2	5,0	23,8	12,8	15,4	48,6	28,0	32,1
Octubre	8,0	2,0	3,2	10,6	5,6	4,6	13,6	7,0	3,6	20,6	19,0	16,4
Noviembre	2,6	9,8	2,6	1,4	6,6	5,2	2,6	20,0	2,6	6,2	27,6	13,2
Diciembre	0,4	1,8	1,4	3,4	1,0	3,8	1,0	1,8	1,4	5,8	2,8	18,8

Asociado a lo anterior, es posible detectar que la intensidad de diseño (21,07/mm/30min) empleada para la construcción de las obras de conservación de suelo durante el año 2002, son superiores a lo registrado por los pluviógrafos, evidenciando que estos diseños no han sido sobrepasados, dando la certeza que los procedimientos seguidos para la estimación de las intensidades máximas de diseño para cada una de las obras planteadas, han sido los correctos. Cabe indicar que los montos de precipitación en los ensayos de Paredones y Llanillos en el segundo semestre (agosto-diciembre) del 2002 fueron de 187 y 367,4 mm respectivamente; valores de precipitación altos para la época, la zona y sus características de semiaridez. Por su parte, los montos anuales de precipitación del 2003 y 2004, en dichos ensayos, fueron de 398,6 y 404,6 mm; y en Llanillos los montos fueron de 587,0 y 735 mm, respectivamente, asociando dichos valores a registros normales de un clima de secano de régimen semiárido. Asimismo, los valores más altos de intensidad de la lluvia registrados durante este periodo no provocaron problemas de construcción ni desbordes del canal de evacuación, sino que permitió la captación y desviación de las aguas a zonas de drenaje o quebradas aledañas; así también, se consiguió detener efectivamente el acelerado avance erosivo de la cárcava.

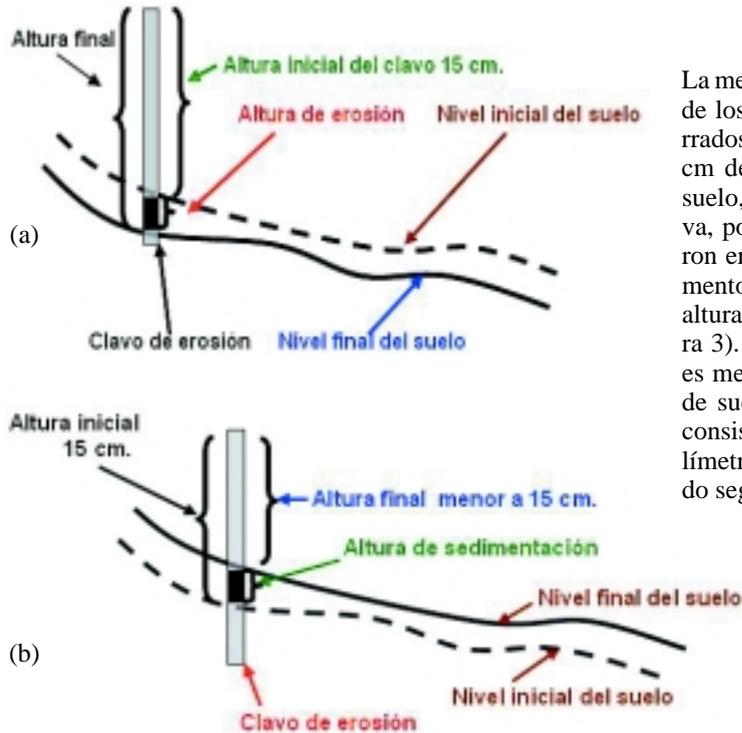
Medición de Clavos de Erosión

El trabajo de medición efectuado en los clavos de erosión fue realizado durante agosto de 2002 a diciembre de 2004, en períodos que estuvieron determinados por el término de los respectivos eventos de precipitación. Para el análisis del avance de la cárcava, se consideró dos fases o situaciones;

- Situación 1: Antes de la construcción del canal de desviación, agosto-2002 a mayo-2003
- Situación 2: Después de la construcción del canal, desde mayo-2003 hasta la fecha.

A partir de ello, el diseño del ensayo consideró la instalación georreferenciada de clavos de erosión como una red de puntos que representa la forma topográfica de la cárcava. Cada clavo fue identificado individualmente lo que permitió observar su comportamiento a través del tiempo. Las mediciones fueron realizadas con una regla graduada en mm, adaptada para tal efecto, es decir, el cero coincide con el borde de la regla. Así, los datos fueron medidos en milímetros y registrados en formularios diseñados para tales efectos.

Cuantificación de la erosión hídrica



La metodología consistió en la medición de los clavos de erosión, que son enterrados en el interior de la cárcava con 15 cm de altura sobre el nivel inicial del suelo, y en forma perimetral a la cárcava, por lo que los clavos que presentaron erosión fueron aquellos que al momento de ser medidos presentaron una altura mayor a los 15 cm iniciales (Figura 3). En caso contrario, si la medición es menor a 15 cm, se está en presencia de suelo sedimentado. Las mediciones consistieron en registrar la altura en milímetros del suelo perdido o sedimentado según sea el caso (Cuitiño, 1999).

Figura 3. Medición del clavo de erosión
(a) clavo con altura de erosión; (b) clavo con altura de sedimentación

Para cuantificar la erosión hídrica se realizó el siguiente procedimiento:

- Los clavos son enterrados a 15 cm, sobre la superficie y se fija el nivel cero de cada clavo. Posteriormente, en cada evaluación los clavos son medidos desde su cabeza hasta el nuevo nivel del suelo. Si el nuevo nivel es menor que el nivel cero, entonces hubo erosión; al contrario, sedimentación.
- Cada medida involucró medir un total de 83 clavos para el ensayo Paredones y 153 en el ensayo Llanillos.
- Para la medida promedio de variación del nivel del suelo, se sumó el total de milímetros acumulados por los clavos, como diferencia positiva o negativa con respecto al nivel cero, y se dividió por el total de clavos.

La expresión matemática que representa lo anterior es:

$$\Delta h = \frac{\sum C_i}{N} \quad (1)$$

Donde,

Δh : Variación nivel de suelo (cm)

ΣC_i : Variación vertical de cada clavo con respecto al nivel de suelo cero

N : Número total de clavos

Los resultados de los ensayos de Paredones y Llanillos, indican que el comportamiento de los procesos de sedimentación y erosión fue divergente en las dos caras de la ladera de una cárcava, conforme a la dirección y la intensidad de la lluvia. En los cuadros 8 y 9, se presenta la variación del nivel de suelo para el total del ensayo y en cada fecha de control, además de los valores obtenidos por ambas exposiciones de laderas de la cárcava.

Cuadro 8. Variación del nivel del suelo (erosión o sedimentación) en centímetros, ensayo de Paredones

Fecha de medición	Variación del nivel del suelo	Variación del nivel de suelo por exposición este	Variación del nivel de suelo por exposición oeste
13-08-2002	-0,02	-0,02	-0,03
21-08-2002	-0,07	-0,01	-0,14
09-09-2002	-0,02	0,11	-0,18
24-09-2002	0,23	0,29	0,16
06-12-2002	0,17	0,35	-0,04
09-05-2003	0,10	0,21	0,36
15-10-2003	-0,10	0,11	-0,37
10-12-2003	0,09	0,14	0,03
24-03-2004	0,01	0,30	-0,34
01-04-2004	-0,24	-0,07	-0,45
29-04-2004	0,20	0,12	0,30
18-06-2004	0,64	0,05	1,45
06-08-2004	0,40	0,38	0,43
14-09-2004	1,30	1,07	1,61
21-09-2004	0,50	0,78	0,16
19-12-2004	0,95	0,89	1,02

Cuadro 9. Variación del nivel del suelo (erosión o sedimentación) en centímetros, ensayo de Llanillos, Cárcava 1 y 2

Fecha de Medición	Cárcava 1			Cárcava 2		
	Variación del nivel del suelo	Variación del nivel del suelo por exposición Suroeste	Variación del nivel del suelo por exposición Noreste	Variación del nivel del suelo	Variación del nivel del suelo por exposición Suroeste	Variación del nivel del suelo por exposición Noreste
12-08-2002	-0,14	-0,08	-0,20	-0,02	0,16	-0,24
09-09-2002	-0,09	-0,12	-0,05	-0,17	-0,20	-0,13
24-09-2002	-0,17	-0,26	-0,90	-0,20	-0,25	-0,15
13-12-2002	-0,53	-0,07	-0,13	-0,16	-0,01	-0,34
24-04-2003	-0,35	-0,63	-0,16	-0,47	-0,62	-0,29
13-06-2003	-0,26	-0,51	-0,02	-0,29	-0,42	-0,19
16-10-2003	0,06	0,08	0,03	-0,08	0,01	-0,18
12-12-2003	0,04	0,10	-0,01	-0,22	0,00	-0,45
04-04-2004	0,11	0,08	0,14	0,25	0,72	-0,09
28-04-2004	0,13	0,10	0,16	0,09	0,45	-0,27
17-06-2004	0,09	0,15	0,02	-0,06	0,07	-0,25
23-06-2004	0,01	0,05	-0,04	-0,17	-0,03	-0,42
09-08-2004	-0,05	0,01	-0,11	-0,04	0,29	-0,45
20-09-2004	0,26	0,51	-0,02	-0,08	0,20	-0,49
19-10-2004	-0,09	-0,07	-0,11	-0,10	0,10	-0,44

Un elemento importante al momento de implementar los ensayos es que al comienzo de las mediciones del año 2003 existía una incipiente cubierta vegetal, la que fue desarrollándose en el interior de la cárcava, la cual no fue removida con el propósito de observar el comportamiento de las cárcavas bajo condiciones de regeneración natural (ver Anexo II). Luego, junto con la construcción del canal de desviación, se realizó una limpieza de la vegetación existente en la cárcava, de tal forma de asemejar ambas situaciones en el comienzo de la medición.

En forma complementaria se puede graficar el comportamiento temporal de los resultados obtenidos de las mediciones de los clavos, para visualizar el efecto causado por el proceso sedimentación/erosión antes y después de la construcción del canal de desviación de aguas lluvias (gráficos 1, 2 y 3).

Cabe recordar que el día 15/05/03, corresponde a la fecha de construcción del canal, con lo cual se observa, en términos absolutos, un aumento en la sedimentación, pasando de una variación del nivel de suelo de - 0,1 cm el día 09/05/03, a una variación del nivel de suelo de 0,95 cm el día 19/12/04, disminuyendo notablemente las alturas erosionadas dentro de la cárcava.

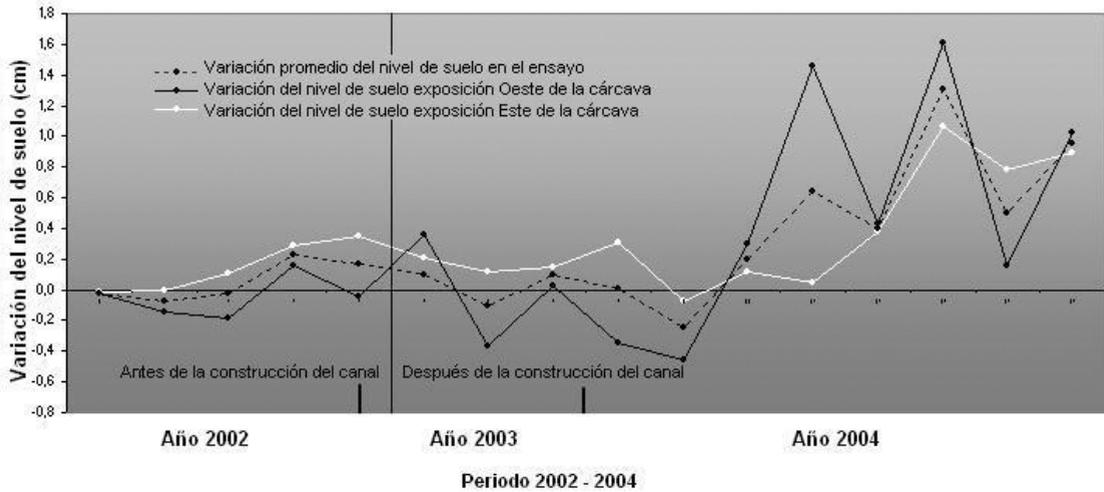


Gráfico 1. Ensayo Paredones, Variación del nivel del suelo (erosionado o sedimentado) en cm, para el período de estudio

Después de 28 meses de medición en Paredones, y en condiciones de suelo desnudo con una pendiente media de 32% y la construcción de un canal que evitaba la entrada de agua a la cárcava, la variación del nivel de suelo alcanzó 0,95 mm, para un monto de precipitación acumulada en los 28 meses de 1025,5 mm. Asimismo, en el interior de la cárcava la variación del nivel de suelo con exposición de ladera Este, alcanzó a 0,89 mm y con exposición de ladera Oeste, un valor de 1,02 cm, lo que supone que el proceso dominante es la sedimentación en ambas laderas. En tanto, en Llanillos se visualizó después de 28 meses de medición y en condiciones de suelo semidesnudo con una pendiente media de 27%, que los valores obtenidos al final del período de medición son negativos, es decir se está en presencia de erosión, pero ésta es menor que los valores obtenidos antes de la construcción del canal de desviación de aguas lluvias, ya que de - 0,53 cm a finales del año 2002 se ha llegado a - 0,09 cm en el término de esta temporada (Octubre 2004) para la cárcava 1. De igual forma para la cárcava 2, de - 0,16 cm a finales del año 2002, pasó a - 0,1 cm en el término de la misma temporada 2004.

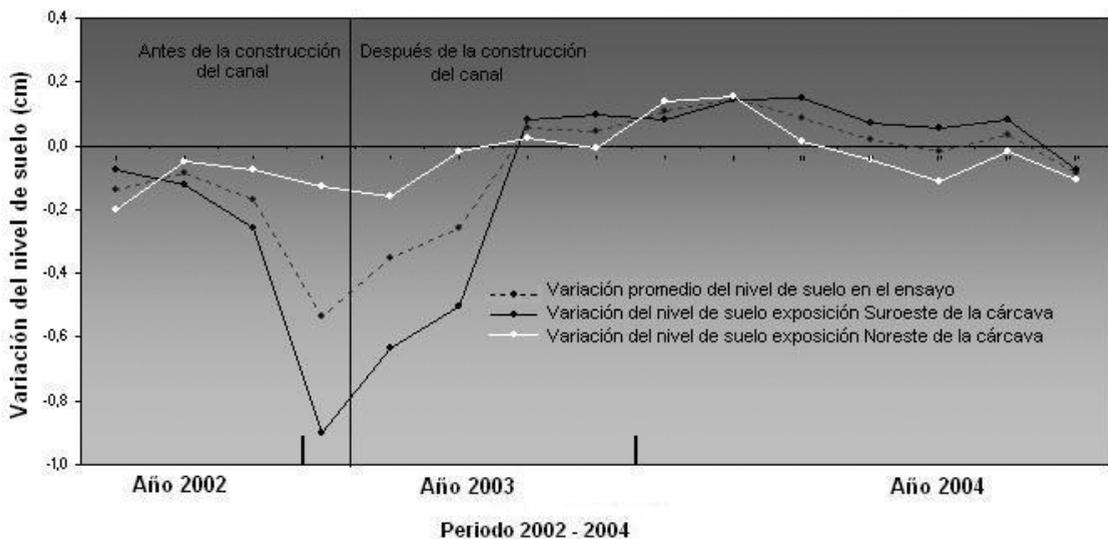


Gráfico 2. Ensayo Llanillos, Cárcava 1, Variación del nivel del suelo (erosionado o sedimentado) en cm, para el período de estudio

El gráfico 2, revela el sorprendente efecto en el proceso de sedimentación de la cárcava 1 de Llanillos, a partir de la construcción del canal de desviación, y por sobre todo, existe una diferencia significativa entre la variación del nivel de suelo entre la exposición Suroeste y Noreste de la cárcava, enunciando que el tratamiento biológico y/o mecánico de estabilización debe realizarse con mayor rigurosidad, en este caso particular, en la exposición Suroeste.

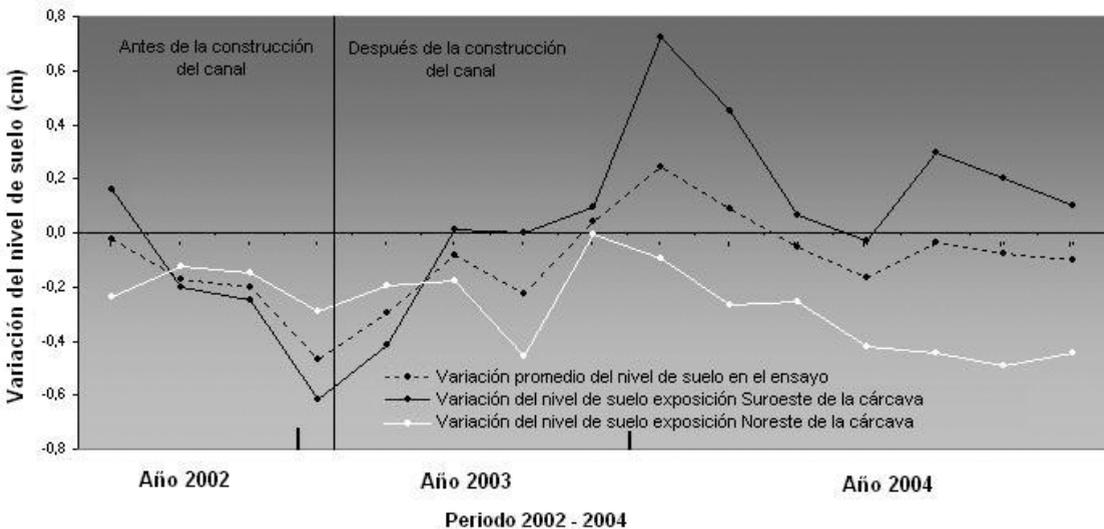


Gráfico 3. Ensayo Llanillos, Cárcava 2, Variación del nivel del suelo (erosionado o sedimentado) en cm, para el período de estudio

Por otra parte, es en la exposición Noreste de la ladera de la cárcava 2 de Llanillos, donde se produce la mayor pérdida de suelo con - 0,44 cm. Esto supone que el proceso erosivo del suelo es mucho más pronunciado en la cárcava 2 que en la cárcava denominada 1, lo que demanda soluciones mayores, en términos biológicos-mecánicos.

De acuerdo con esto, se puede manifestar que los objetivos propuestos para la ejecución del canal de desviación se cumplieron, y se verifica que es una obra que permite controlar y/o reducir eficazmente los procesos erosivos de manto, surcos y cárcavas. Ahora bien, en términos de los estándares de diseño, el Proyecto EIAS ha determinado una serie de marcos metodológicos, los cuales han demostrado su efectividad.

Por su parte, el diseño preliminar en las visitas de reconocimiento preestablece un trazado con pendiente entre 0,5 y 5%, que después serán corregidos con los instrumentos tacométricos y/o topográficos. La determinación del coeficiente de escorrentía correspondiente a la zona de impluvio del canal, debe ser ponderado en base a tablas técnicas (Chow *et al.*, 1994).

Adicionalmente, cabe recordar que no es exclusividad de la escorrentía superficial los cambios sufridos en el interior de la cárcava, si no que también se combinan dos factores; el viento predominante al momento de desatarse la tormenta y la intensidad de precipitación. En el caso particular del ensayo de Paredones, el viento predominante presenta dirección Oeste y la intensidad de lluvia sobre los 15 mm/h, los que representan una verdadera amenaza. Así por ejemplo, la máxima precipitación en 1 hora registrada en todo el período de control correspondió a 22 mm. Ahora bien, la desaceleración del proceso erosivo al interior de la cárcava sólo se notaría al combinar la construcción de un canal de desviación y la implementación de biotecnias, o bien, con una forestación de especies arbóreas, de modo de estabilizar los taludes inestables de las laderas de la cárcava.

Por otra parte, fue posible observar la relación que existe entre las precipitaciones con el accionar de la dinámica de la cárcava. Esto puede ser apreciado en los gráficos 4, 5 y 6, donde se muestra la relación de

las intensidades de precipitación en 1 y 24 h. y los procesos de erosión y sedimentación suscitados en el interior de la cárcava.

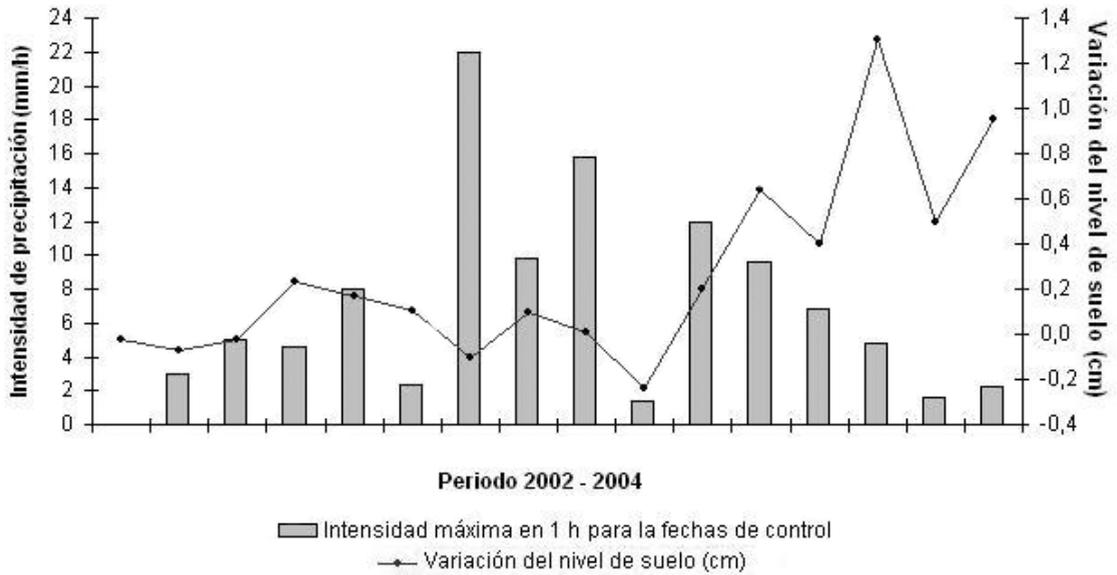


Gráfico 4. Intendencia máxima de precipitación en 1 h v/s Variación del nivel del suelo (Paredones)

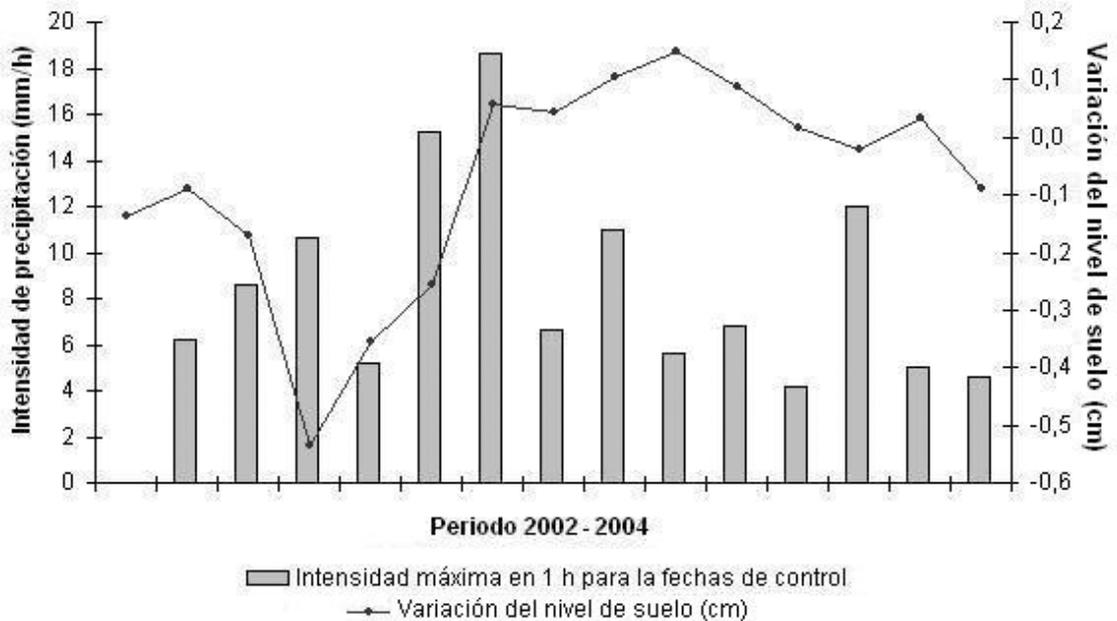


Gráfico 5. Intendencia máxima de precipitación en 1 h v/s Variación del nivel del suelo (Cárcava 1, Llanillos)

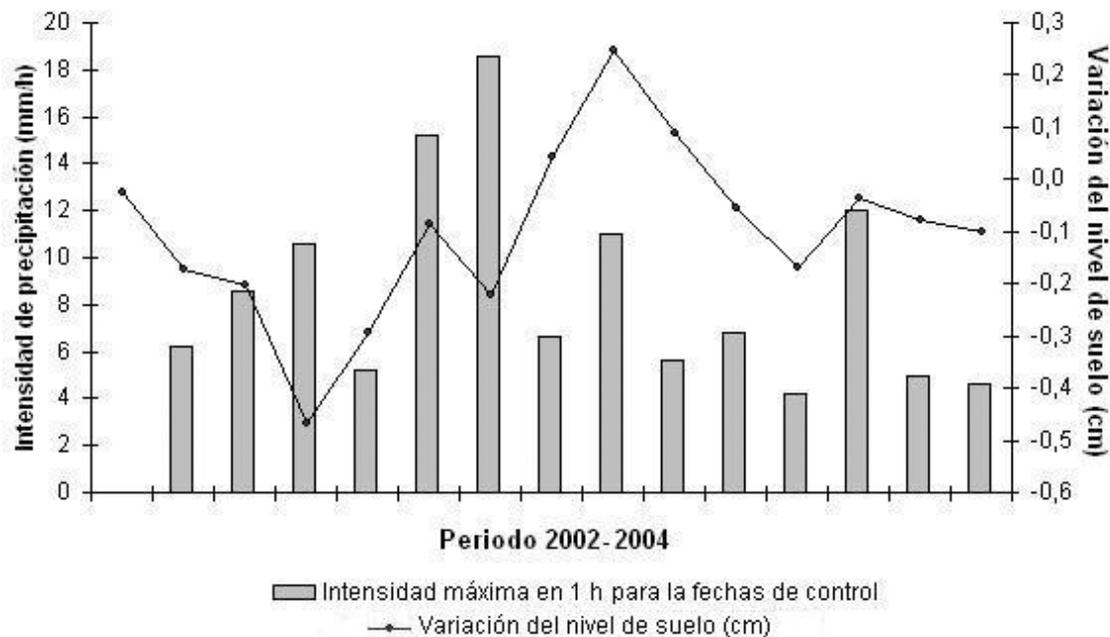


Gráfico 6. Intensidad máxima de precipitación en 1 h v/s Variación del nivel del suelo (Cárcava 2, Llanillos)

Si bien los gráficos no permiten visualizar una correlación directa entre la intensidad máxima de la lluvia y la variación del nivel de suelo, se puede señalar que sí existe una mayor cantidad de eventos producidos en el periodo invernal, éstos generan mayores movilizaciones de suelo, y con mayores efectos negativos sobre las cárcavas, lo que tendrá una mayor incidencia en las capas más superficiales del suelo, viéndose afectada directamente no sólo la productividad del sitio, sino también la seguridad por movimientos verticales de suelos en bloque y la composición textural de los terrenos adyacentes (anexo II).

Finalmente, los parámetros y los criterios involucrados en el diseño, trazado y la construcción del canal de evacuación de aguas lluvias, han sido utilizados conforme al correcto diseño hidrológico de gabinete y las exhaustivas revisiones en terreno para ambos ensayos (anexo III), ya que los canales no han sido sobrepasados por caudales superiores a los presupuestados y que el único trabajo de mantenimiento realizado en ellos corresponde a la limpieza en el interior del canal del ensayo Llanillos (VII Región), producto de una excesiva sedimentación. De acuerdo a esto, y a la luz de los resultados observados hasta la fecha, los canales de desviación han cumplido con el objetivo planteado por este proyecto, generando una disminución efectiva de la erosión en el interior de la cárcava, para dar paso a un aumento paulatino de la sedimentación al interior de la misma.

Consideraciones finales

En términos prácticos, la construcción de obras de control de laderas, en especial, el canal de desviación, resulta fundamental para reducir los altos niveles de erosión de Chile (más de 30 millones de hectáreas erosionadas), pues la prioridad es recuperar los suelos altamente degradados e integrar una mayor superficie con un propósito productivo agrícola y/o forestal. Así también, los canales cumplen con otras funciones o beneficios ambientales, entre ellos, permiten disminuir las situaciones de riesgo de un alud ante un evento extremo, y la recolección de aguas lluvias para zonas de alta escasez pluviométrica en gran parte del año.

El método de los clavos de erosión es aplicable para detectar y cuantificar la erosión del suelo desde su inicio, en términos de establecer un balance entre pérdidas y entradas de suelo en un sector determinado, permitiendo realizar estimaciones más reales de las pérdidas de suelo producidas en el lugar, lo cual diferencia a este método de otros más tradicionales (escorrentómetro), que al no considerar el balance entre pérdidas y entradas de suelo, sobreestiman la erosión. Así, los factores que influyen significativamente en el mayor o menor grado de la erosión hídrica y que pueden ser manejados por el hombre, corresponden a la pendiente del terreno y la cobertura vegetal.

En la búsqueda tecnológica de los elementos técnicos-matemáticos de diseño e ingeniería hidrológica, cabe señalar que el país ha pasado por dos etapas en el proceso de investigar, crear y combinar diseños y materiales para obras de conservación de aguas y suelos más eficientes. Una primera fue la de probar empíricamente estas obras y analizar sus resultados, lo cual a la luz de la experiencia obtenida, es muy aconsejable, al menos desde una perspectiva ambiental. La segunda etapa ha sido la de buscar pautas técnicas, pero la cual ha sido abordada sin incorporar elementos técnicos de ingeniería hidrológica, y asumiendo condiciones generales, lo cual no puede ser extrapolado a condiciones distintas en las que las obras fueron probadas, situación que fue enfrentada por este proyecto. Asimismo, es necesaria una tercera etapa, que determine cuáles son las condiciones que económicamente son más compatibles con la mantención y/o incremento de la productividad forestal.

Estas dos instancias, (término de la segunda etapa e inicio de la tercera), son las que el proyecto EIAS ha abordado, en base a tres tipos de obras de conservación de suelos y aguas (zanjas de infiltración, subsolado y canales de desviación de aguas lluvias), y es básicamente el marco a partir del cual deberán analizarse los esquemas futuros de aplicación de estas tecnologías. Asimismo, si esto no había sido hecho con anterioridad, obedece a que es parte de un proceso natural de desarrollo tecnológico, y que hasta ahora, no se habían incorporado las dimensiones de la ingeniería hidrológica. De igual forma, este reto es decisivo para el futuro, porque de él depende el poder asegurar desde una perspectiva determinística, si estas obras poseen asidero técnico y económico, además de ambiental.

Referencias bibliográficas.

- CARLSON, P. 1990. Establecimiento y manejo de prácticas agroforestales en la sierra ecuatoriana. Editorial Cormen, Quito - Ecuador. pp. 24-111.
- CHOW, V.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. 1994. Manual de Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill. 584 p.
- CONAMA. 1994. «Propuesta, Plan nacional de conservación de suelos». Comisión Nacional del Medio Ambiente, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile. 119 p
- CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF). 2000. Informe final módulo demostrativo obras de conservación y recuperación de suelos degradados. Talca, Chile. 27 p.
- CUITIÑO, H. 1999. Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos de la Precordillera Andina y Valle Central de la VII Región del Maule, Chile. Tesis de pregrado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Talca. Chile. 103 p.
- FRANCKE, S. 1996. Elementos de ordenación de cuencas y conservación de suelos. Documento técnico N° 101. CONAF. Revista Chile Forestal. Santiago - Chile.
- FRANCKE, S.; VARGAS, R.; WILLIAMS, E.; PINTO, M.; BARRÍA, B. 1999. Recuperación de suelos degradados en el marco de la nueva Ley de Fomento Forestal. Corporación Nacional Forestal. Santiago. Chile. 83 p.
- GALLARDO, E. 1994. Marco legal de la erosión, cultivos y recuperación de suelos. En: Seminario erosión, cultivos y recuperación de suelos. Santiago, Chile. 36 p.
- MORALES, J.; UZON, V. 1995. Recuperación de Suelos en Sistemas Productivos Campesinos de Chile Central. Experiencias prácticas para extensionistas. Departamento Forestal. Corporación Nacional Forestal. Chile. s/p.
- NAVARRO, G.; LEMUS M.; VÁZQUEZ, R. 2001. Manual para el desarrollo de Obras de conservación de suelo. San Fernando. Chile. 71 p.
- PERALTA, M. 1976. Uso, clasificación y conservación de suelos. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Gobierno de Chile. Santiago. Chile. s/p.
- PIZARRO, R. 1988. Elementos técnicos de hidrología II: Proyecto regional sobre uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América Latina y el Caribe. Conaf. IV Región. Chile. 109 p.
- PIZARRO, R., ABARZA, A., FARIAS, C. 2001. Análisis comparativo de las curvas intensidad-duración-frecuencia IDF, en 6 estaciones pluviográficas distribuidas en la VII región del Maule. En Acta el XV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. p, 15-25.
- PIZARRO, R.; SANGÜESA, C.; FLORES, J.; MARTÍNEZ, A.; PONCE, M. 2004. Revisión y análisis de prácticas tradicionales de conservación de aguas y suelos en zonas áridas y semiáridas de Chile Central. Chile. 111 p.
- PIZARRO, R.; FLORES, J.; SANGÜESA, C.; MARTÍNEZ, A.; GARCÍA, J. 2004. Diseño de obras para la conservación de aguas y suelos. Chile. 146 p.
- SOCIEDAD EIAS LTDA. 2002. Proyecto FDI - CORFO 00C7FT - 08: Determinación de Estándares de Ingeniería para Obras de Conservación y Aprovechamiento de Aguas y Suelos, para la Mantenimiento e Incremento de la Productividad Silvícola. En internet: <http://eias.utralca.cl>
- TORO, J. 1994. Erosión, cultivos y recuperación de suelos; una visión técnica. p. 9-12. In: Erosión, Cultivos y Recuperación de Suelos. Santiago 6 de Septiembre 1994. Santiago, Chile. 36 p.
- VARGAS, R.; FRANCKE, S.; TOKUGAWA, K.; MAKITA, M. 1998. Manual de control de erosión. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile. 73 p.

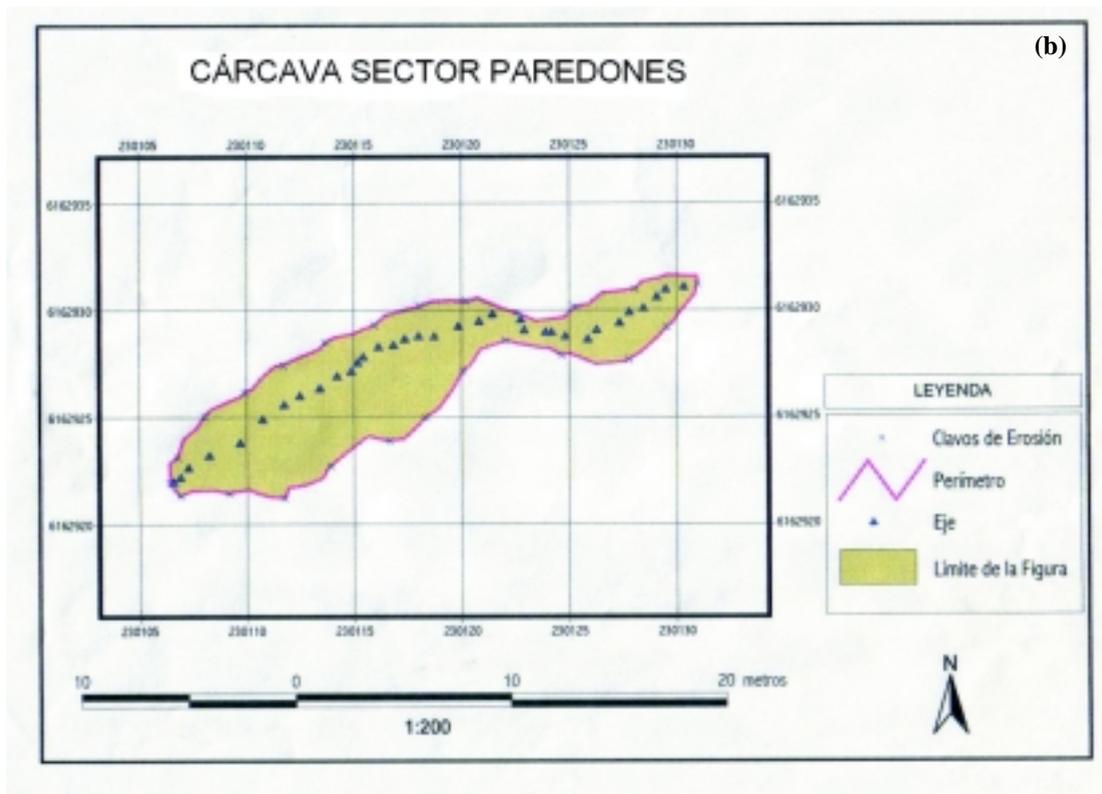
ANEXOS

ANEXO I

A. Ubicación de los ensayos de evaluación y control de cárcava en Paredones (VI Región)



(a)



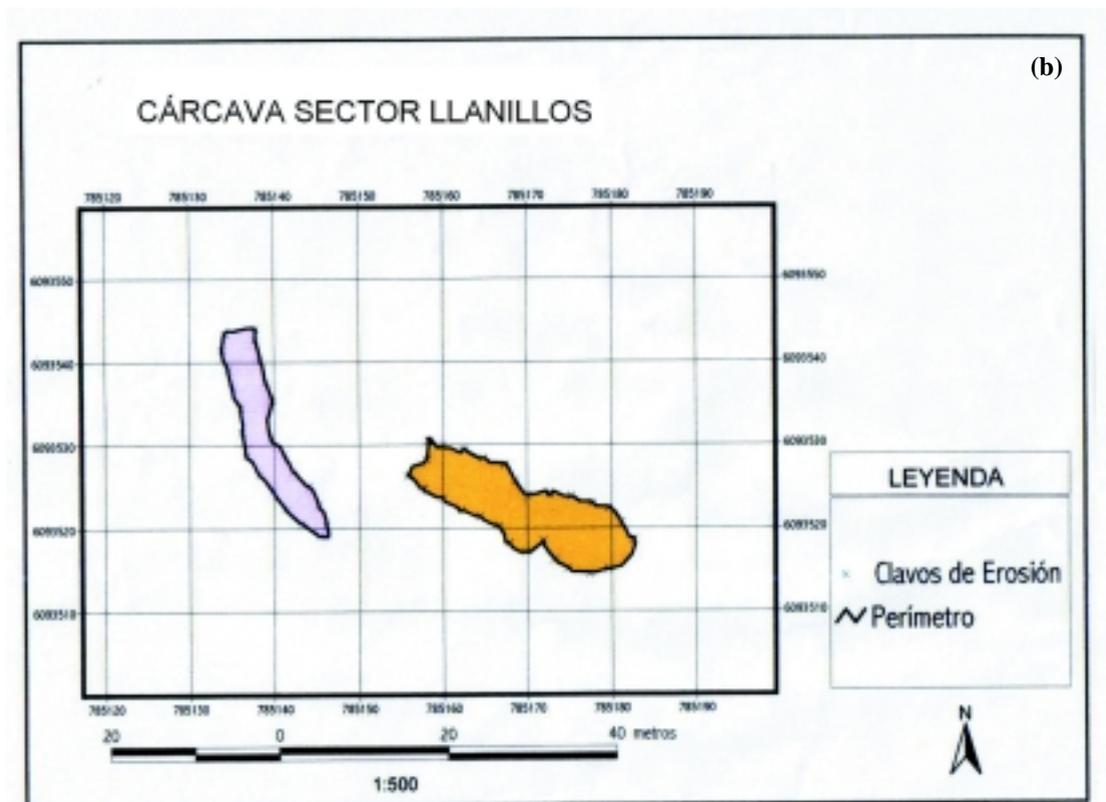
(b)

Fotografía 4. Ensayo Paredones, VI Región, (a) Vista panorámica
(b) Plano georreferenciado de la cárcava

B. Ubicación de los ensayos de evaluación y control de cárcavas en Llanillos (VII Región)



(a)



Fotografía 5. Ensayo Llanillos, VII Región (a) Cárcavas 1 y 2 del ensayo
(b) Plano georreferenciado de las cárcavas

ANEXO II

Daños producidos en el perímetro de la cárcava de Paredones (VI región), ocasionadas por las precipitaciones.



Fotografía 6. Vista frontal de la cárcava



Fotografía 7. Vista aérea de la estaca, Exposición Oeste. Año 2003



Fotografía 8. Exposición Oeste de la cárcava, con daño, Año 2003



Fotografía 9. Inicio de la cárcava Exposición Oeste, año 2002



Fotografía 10. Inicio de la cárcava,
Exposición Oeste, Año 2003



Fotografía 11. Exposición
Este de la cárcava, sin daño

ANEXO III

Diseño y construcción de canal de desviación de aguas lluvias



Fotografía 12. Uso de nivel para la marcación de canal de desviación en Paredones (VI) Región



Fotografía 13. Canal de desviación en Paredones (VII Región)



Fotografía 14. Vistas general del canal de desviación en Paredones (VI Región)



Fotografía 15. Marcación en terreno del canal de desviación en Llanillos (VII Región)



Fotografía 16. Uso de molde para la construcción del canal de desviación en Llanillos (VII Región)



Fotografía 17. Vistas del canal de desviación en Llanillos (VII Región)

