



Informe final
**«Antecedentes para la elaboración de la
normativa técnica del Bosque Nativo
sobre protección de suelos, aguas
y humedales»**

Septiembre 2008

Consultoría encargada por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias - ODEPA -, Los comentarios que se hacen en este estudio no representan necesariamente la opinión de ODEPA.



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE AGRICULTURA

Antecedentes Para la Elaboración de la Normativa Técnica del Bosque Nativo Sobre Protección de Suelos Aguas y Humedales

INFORME FINAL

**SEPTIEMBRE - 2008
INSTITUTO FORESTAL
CAMINO CORONEL KM.7,5 SAN PEDRO DE LA PAZ**

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	4
2.	OBJETIVOS	5
3.	ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS	6
3.1.	Legislación y Normativa vigente	6
3.2.	Factores que Influyen en la Erosión del Suelo	7
3.2.1.	Factores del sitio	8
3.2.1.1.	Clima	9
3.2.1.2.	Propiedades del suelo	10
3.2.1.3.	Topografía	11
3.2.2.	Factores del Manejo Forestal	12
3.2.2.1.	Tipo y Descripción de Maquinaria de Cosecha	14
3.2.2.2.	Preparación del suelo y sistema y diseño de los caminos	16
4.	ESTUDIO DE CASO Y ASPECTOS OPERACIONALES	17
4.1.	Modelación hidrológica	17
4.1.1.	Área de estudio	17
4.1.2.	Recopilación de antecedentes	20
4.1.3.	Escenarios supuestos	20
4.1.4.	Pre-procesamiento	21
4.1.5.	Modelo de Simulación WaSIM-ETH	21
4.1.6.	Descripción de los módulos del Modelo WaSIM	22
4.1.7.	Producción de sedimentos y Generación de Escorrentía	24
4.1.7.1.	Parcelas de escorrentía	24
4.1.7.2.	Estructura de registro del sitio de estudio	26
4.1.7.3.	Registro de escorrentía	27
4.2.	Resultados y Discusión	29
4.2.1.	Modelación hídrica	29
4.2.2.	Parcelas de Escorrentía	31
4.3.	Conclusiones y consideraciones finales del estudio	32
5.	NIVELES DE EROSIÓN Y APORTES DE SEDIMENTOS	34
5.1.	Pérdida y Formación de Suelos	35
5.2.	Pérdida Tolerable del Suelo	38

6.	BIBLIOGRAFIA	4 1
7.	ANEXO	4 4

1. INTRODUCCIÓN

La actividad silvícola tal como la conocemos nace formalmente, con las primeras escuelas de ingeniería forestal, a mediados de la década de los años 40. A esa fecha, ya se contaba con un marco jurídico denominado Ley de Bosques del año 1931 (D.S. N° 4.363), ley que fue creada para normar las actividades en plantaciones y en vegetación nativa de modo de incentivar la forestación, mediante beneficios económicos.

En esta ley por primera vez se hace referencia a la actividad silvícola y restricciones a la cosecha del bosque nativo, éstas prohíben:

- La corta de árboles y arbustos nativos situados a menos de 400 metros sobre manantiales que nazcan en los cerros y los situados a menos de 200 metros de sus orillas, desde el punto en que la vertiente tenga origen, hasta aquel en que llegue al plan.
- Se prohíbe la corta o destrucción del arbolado situado a menos de 200 metros del radio de los manantiales que nazcan en terrenos planos no regados (artículo 5).
- En el año 1990 se modifica este el Artículo 5 agregando la prohibición de corta de árboles y arbustos nativos situados en pendientes superiores a 45 %.

En el año 1974 se promulga el Decreto Ley N° 701 con la finalidad de regular el uso racional de los recursos naturales renovables de los terrenos forestales, conservación, mejoramiento, protección e incremento de los recursos forestales del país. El D.L. 701 también contiene disposiciones aplicables al bosque nativo, entre ellas destacan las definiciones legales, tales como, bosque, corta no autorizada, pequeño propietario forestal, plan de manejo. Aquí se establece la obligación de establecer “planes de manejos” cuando se pretenda efectuar cualquier corta o explotación del bosque nativo.

Para el bosque nativo se generó el Reglamento Técnico D.S. N° 259/1980. Este reglamento reconoce 12 tipos forestales, para los cuales se norman distintos métodos de corta y restricciones específicas. El reglamento regula, específicamente, el manejo del bosque nativo de modo de asegurar la regeneración, reconociendo los siguientes métodos de corta: *Corta a tala rasa, corta del árbol semillero, corta de protección y corta selectiva o entresaca.*

Esta normativa ha tenido por objetivo velar por la sustentabilidad del bosque nativo, es decir, que se obtengan productos de calidad en forma continua, sin embargo, son numerosos los estudios que demuestran la descapitalización económica por pérdida de cantidad, calidad, y de estructura del recursos ya sea porque se extrajo demasiada madera o fue sobreutilizado. Si

consideramos válido lo anteriormente expuesto, se desprende que la normativa técnica vigente requiere actualizarse para asegurar la protección e incremento de recurso forestal nativo.

El objetivo del plan de manejo del D.L 701 es regular el uso y aprovechamiento racional de los recursos naturales renovables de un terreno determinado, con el fin de obtener el máximo beneficio de ellos, asegurando al mismo tiempo la preservación, conservación, mejoramiento y acrecentamiento de dichos recursos su ecosistema. De la definición se observa una preocupación por el bosque nativo y su sustentabilidad, sin embargo donde se observa deficiencias para la conservación y el buen desarrollo del bosque nativo son en la obligación de realizar las cosechas de acuerdo a ciertos criterios silvícolas aprobados, que en la práctica esta ley y su normativa no fue muy satisfactoria, transformándose el plan de manejo en un instrumento de permiso de explotación.

La nueva *Ley sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento (2008)*, redefine el concepto de “plan de manejo” como un instrumento donde se “planifica la gestión del patrimonio ecológico o el aprovechamiento sustentable de los recursos forestales de un terreno determinado, resguardando la calidad de las aguas y evitando el deterioro de los suelos”. En este sentido y como una forma de apoyar al éxito de esta ley, la Subsecretaría de Agricultura y ODEPA realizaron convenios con INFOR para elaborar estudios y sistematizar información conducente a elaborar una propuesta para definir las regulaciones a establecer a la actividad forestal extractiva para la protección de suelos, aguas y humedales.

El presente convenio entre ODEPA e INFOR, tiene por finalidad, generar antecedentes complementarios a los trabajos definidos en el convenio de colaboración SUBSECRETARIA - INFOR, como un mecanismo de fortalecer los antecedentes existente y a la vez generar el apoyo necesario para la implementación de la nueva la normativa técnica del Bosque Nativo.

2. OBJETIVO

Desarrollar una propuesta técnica acerca de los niveles de erosión y de aporte de sedimentos a cauces de agua y humedales que debería considerar la normativa técnica para apoyar la ley sobre el bosque nativo.

3. ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS

3.1 Legislación y Normativa sobre Suelos

Desde el punto de vista de la legislación, existe un vacío en lo que se refiere a conservación del recurso suelo, ya que no hay un marco ordenador, aunque existen disposiciones legales y reglamentarias que afectan la conservación del recurso. La mayoría se trata de normas que fueron dictadas en diferentes épocas y que tratan al suelo desde perspectivas disímiles y parciales, sin una visión sistémica del ambiente y sin una clara opción por la protección y conservación del mismo (CONAMA - MINAGRI, 2000).

Decreto Ley 701: El D.L. 701 sobre Fomento Forestal define al Plan de Manejo como el *“Instrumento que regula el uso y aprovechamiento racional de los recursos naturales renovables de un terreno determinado, con el fin de obtener el máximo beneficio de ellos, asegurando al mismo tiempo la preservación, conservación, mejoramiento y acrecentamiento de dichos recursos y su ecosistema”*. De la misma manera,

Ley de Bases del Medio Ambiente: La Ley 19.300 en su Art. 39 especifica que: *“la ley velará porque el uso del suelo se haga en forma racional, a fin de evitar su pérdida y degradación”*

La ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente, en su Art. 42, refuerza lo indicado en el D.L. 701 señalando que el organismo público encargado por la ley de regular el uso o aprovechamiento de los recursos naturales en un área determinada, exigirá, de acuerdo con la normativa vigente, la presentación y cumplimiento de planes de manejo de los mismos, a fin de asegurar su conservación. Estos incluirán, entre otras, la mantención de caudales de aguas y conservación de suelos

Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía: Esta convención, que fue ratificada mediante DS Nº 2065 del Ministerio de relaciones Exteriores, del 20.11.97, señala entre sus obligaciones generales que: Art 4, inciso 2, letra d) las partes fomentarán la cooperación en materia de protección ambiental y de conservación de los recursos de tierras y los recursos hídricos, en la medida en que ello guarde relación con la desertificación y la sequía; Art. 5, letra e) las partes afectadas se comprometen a crear un entorno propicio, según corresponda, mediante el fortalecimiento de la legislación pertinente en vigor y, en caso de que ésta no exista, la promulgación de nuevas leyes y el establecimiento de políticas y programas de acción a largo plazo. Además, obliga a los países parte a diseñar Programas de Acción Nacionales, que contemplen, entre otros: Art. 10, inciso 2, letra c) prestar atención especial a la aplicación de medidas preventivas para las tierras aún no degradadas o sólo levemente degradadas.

Política Ambiental de Desarrollo Sustentable: El tercer objetivo de la Política Ambiental para el Desarrollo Sustentable, aprobada por el Consejo Directivo de Ministros de CONAMA con fecha 09/01/98, es el de “Fomentar la protección del patrimonio ambiental y el uso sustentable de los recursos naturales”. En lo que se refiere a suelos, señala que se deberá: “Crear normativas específicas que regulen su uso sustentable y su conservación; incorporar actividades de recuperación en zonas degradadas, homogeneizar y actualizar la información de suelos de Chile y realizar una zonificación agroecológica del territorio”.

Programa de Acción Nacional Contra la Desertificación: Este programa fue aprobado por acuerdo del Consejo de Ministros N° 37 del 17/07/97. Entre las acciones sugeridas por este plan se señalan:

- Analizar los instrumentos legislativos de fomento vigentes, y diseñar y proponer alternativas que refuercen su acción hacia el control de la desertificación y mitigación de los efectos de la sequía.
- Diseñar estrategias orientadas a lograr el compromiso de los gobiernos regionales con el tema de la desertificación y la incorporación de esta materia en las estrategias de desarrollo regional.

3.2. Factores que Influyen en la Erosión del Suelo

Los factores que determinan la erosión del suelo forestal se pueden agrupar en *Factores del Sitio*; y *Factores del manejo Forestal* (Froehlich and McNabb, 1984, Lewis y Carr, 1989). Para los factores del Sitio Rice *et al.*, (1981) comprobó que la erosión está determinada por la pendiente, tipo de suelo y equipos de madereo, donde el impacto de la pendiente es de 16 veces, el tipo de suelo 13,5 veces y el tipo de equipo de madereo 3,7 veces.

La gravedad de los fenómenos erosivos depende también de la intensidad de las precipitaciones, el origen del material de suelo, la morfología del terreno y características de los caminos forestales, siendo esta última la mayor fuente de erosión o aporte de sedimentos a los cauces (Burroughs *et al.*, 1984, Ezaki 1984, Hattinger de 1984, Heinrich 1984, Kochenderfer y Halvey de 1987, Lee 1995 citado por Spinelli y Marchi, 1996).

FACTORES DEL SITIO: Dentro de los factores del sitio se consideran como factores relevantes (Froehlich and McNabb, 1984, Lewis y Carr, 1989):

- El Clima: especialmente las precipitaciones, su intensidad y duración.
- Propiedades del suelo: textura y régimen hídrico del suelo.

- La topografía: Grado de pendiente; longitud de la pendiente.

FACTORES DEL MANEJO FORESTAL: La mayoría de las perturbaciones al suelo es causada por el tráfico de los equipos de maderero provocando compactación y desplazamiento del suelo. La compactación se manifiesta en el aumento de la densidad aparente, disminución de penetrabilidad, cantidad y tamaño del espacio poroso, la porosidad de aireación, infiltración, hidrología y conductividad. El desplazamiento del suelo a menudo resulta en la pérdida de la capa superficial del suelo y exposición del subsuelo. Fuera de sitio o lugar de cosecha los efectos de la perturbación del suelo, pueden incluir la erosión, descarga de sedimentos afectando drásticamente la vida asociada al cauce (Froehlich and McNabb, 1984, Lewis y Carr, 1989; Curran, *et al.*, 2005).

En el manejo forestal destacan como relevantes:

- Sistema de maderero
- Preparación del suelo
- Sistema y diseño de los caminos

3.2.1 Factores del Sitio

Existen criterios para entender, cualitativamente, el grado de sensibilidad de aspectos del suelo ej. Riesgo de compactación, erosión, o derrumbe (Mitchell, 1984). Sin embargo el nivel necesario de sofisticación e integración no ha sido logrado de modo de permitir construir un sistema holística. Es posible apreciar una comprensión avanzada de los factores que afectan la sensibilidad de degradación, pero los efectos de estos factores no han sido cuantificados suficientemente.

El proceso tradicional en varios países forestales ha sido desarrollar estándares a partir de los resultados disponibles de investigación y posteriormente aplicarlos subjetivamente para establecer clases o tipos de sensibilidad a la degradación. Lewis (1988) evaluó dos maneras de establecer índices de sensibilidad a la degradación. La primera evalúa directamente los riesgos individuales como derrumbes por pendiente, erosión superficial, desplazamiento del suelo, y compactación; integrando estos aspectos con otros factores del sitio para determinar una clase de sensibilidad. Este método está orientado al proceso y exige mucho tiempo, rindiendo una evaluación del nivel de la degradación y una identificación del proceso de degradación anticipada. El segundo método depende completamente en la evaluación de factores individuales del sitio ejemplo de ello: pendiente, profundidad del suelo, presencia de vertientes, cursos de agua, barrancos, textura del suelo, humedad del suelo, y clima regional. Este método es menos exigente en cuanto al tiempo, pero menos exacto que el primer método.

3.2.1.1 Clima

La influencia estacional de la temperatura, precipitaciones, evaporación, las horas de luz solar y otros factores, pueden significar que la temporada de cosecha es una importante variable de la perturbación del suelo, a menudo con una estrecha asociación con las condiciones de humedad del suelo (Rab *et al.*, 2005). Hatchell *et al.* (1970) informó que el clima húmedo afecta negativamente tanto a la profundidad y la cantidad de perturbaciones, otro autor (Murphy, 1982) encontró tres veces más perturbaciones profundas en sitios más húmedos, en el mismo tipo de suelo. Hammond (1978) (citado por Krag *et al.*, 1986) encontró que la tala de invierno causó más perturbación o alteración del suelo que la tala de verano.

Rab y Dignan (2002) estudiaron el efecto de diversos factores, entre ellos la tala de temporadas, la maquinaria y tipos de huellas sobre el grado y la medida de la perturbación del suelo en los bosques de tierras altas centrales victoriana. Se informó mayor impacto o perturbación de la tala de árboles en la "estación húmeda" (Cuadro 1). Durante el invierno y la primavera el riesgo de dañar el suelo por compactación es claramente superior al de los períodos más secos del año (Bradshaw, 1978; Schuster 1979; Wronski, 1984 citado por Rab *et al.*, 2005).

Cuadro 1: Criterios de cosecha en las estaciones secas y húmedas.

Aspectos por Considerar	Condiciones menos favorables para la cosecha en la estación húmeda	Condiciones más favorables para la cosecha en la estación húmeda
Suelos	Capacidad baja para cargar presión cuando mojados (alta arcilla, poco contenido de rocas), mal drenaje, alta erodibilidad.	Capacidad alta para cargar presión (baja arcilla, alto contenido de rocas), buen drenaje, baja erodibilidad.
Pendientes	Pendientes fuertes o planicies con mal drenaje	Pendientes bajas/moderadas o suaves
Caminos	Caminos de verano	Caminos aptos para todas estaciones
Disponibilidad de Maquinaria	Presión alta	Baja presión o torre
Sensibilidad de Sitio	Ej. Abastecimientos de agua municipal, áreas con especies amenazadas.	

Según Rab *et al.*, (2005) numerosos autores han investigado el efecto del contenido de humedad del suelo en los distintos niveles de esfuerzo de compactación en los suelos de la agricultura y los suelos forestales en todo el mundo (por ejemplo, Saini *et al.*, 1984; Ohu *et al.*, 1987; Stone y Ekwue, 1993; De Kimpe *et al.*, 1982; Felton y Ali, 1992; Wagner *et al.*, 1994; Ekwue y Stone, 1997; Zhang *et al.*, 1997; Mapfumo y Chanasyk, 1998; Aragón *et al.*, 2000;

Froehlich *et al.*, 1980; Howard *et al.*, 1981; Murphy y Robertson, 1984; Beekman, 1987; Smith *et al.*, 1997a; Smith *et al.*, 1997b). Las curvas compactación han sido utilizadas en América del Norte para ayudar a tomar decisiones de gestión en la cosecha forestal, acerca de si las máquinas deben ser autorizados a trabajar en ciertas condiciones críticas de humedad del suelo.

Rab (inédito citado por Rab *et al.*, 2005) evaluó 60 suelos forestales de victoriana los que exhibieron un comportamiento similar, es decir, para un nivel dado de esfuerzo de compactación, el aumento de la densidad aparente del suelo, aumento con el contenido de agua hasta que alcanzó un máximo de densidad. Similar comportamiento típico se ha observado para otros los suelos forestales (Froehlich *et al.*, 1980; Howard *et al.*, 1981, 1984, Smith *et al.*, 1997a).

3.2.1.2. Propiedades del suelo

Los equipos de maderero producen diferente grado de compactación dependiendo del tipo del origen del suelo (cuadro 2) es así que es posible determinar que suelos graníticos son menos susceptibles a la compactación que los suelos volcánicos como lo indica e siguiente cuadro (Froehlich, *et al.*, 1985).

Cuadro 2: Efecto del maderero en dos tipo de suelos y su grado de recuperación.

Tipo de Suelo	profundidad (cm)	Años 1 de cosecha	
		Aumento de densidad	Año 25 de la cosecha
Graníticos	5	25,9	3,0
	15	24.2	12,9
	30	22,7	7,9
Material volcánico	5	44,5	15.4
	15	46.2	26.1
	30	43.3	4.8

Los suelos de ceniza volcánica son altamente susceptibles a la compactación. El nivel de compactación que ocurre después de distintos niveles de intensidad de cosecha en los suelos con 25% contenido de humedad. El promedio de densidad aumentó de 0,65 antes de la cosecha a 0,81 g/cm³ en áreas con compactación severa. Sin embargo la densidad es mucho menor que la densidad de los suelos con textura gruesa de la región que tienen un promedio de 1,0 g/cm³ (cuadro 3). La densidad aumentó 20% en las primeras 4 vueltas con tractor (Page-Dumroese, D. 1993).

Cuadro 3: Variación de la densidad aparente del suelo según tipo de suelo y equipo de madereo (Froehlich, *et al.*, 1978).

Fuente	Notas	Tipo de suelo	Densidad Inicial (g/cm ³)	Densidad Final (g/cm ³)	Profundidad del muestreo (cm)
Steinbrenner 1955	HD-20 Tractor, Oeste de Washington, bosque maduro	Franco limo arcilloso	0.9	3 vueltas: 1.04; 6 vueltas: 1.18	0 – 8
Dickerson 1976	Skidder con neumáticos cargando 3 troncos	Franco limo arcilloso	1.2	7 vueltas: 1.55	0 – 5
Froehlich 1976	Tractor pequeño, raleo, Oregon	Franco arcilloso	1.0	Bajo: 1.17; Moderado: 1.21 Alto: 1.26	0 - 15
Youngberg 1959	Tractor grande, bosque maduro, Oregon	arcilloso	0.8	1.50	0 – 15
		arcilloso	0.8	1.73	15 – 30
		arcilloso	0.8	1.52	0 – 15
		arcilloso	0.8	1.59	15 – 30
Mace 1971	Skidder con neumático, arboles enteros, Minnesota	arenoso	-	Moderado: 0.91 Alto: 1.18	0 – 5
		arenoso	-	Moderado: 1.40 Alto: 1.40	5 - 10

3.2.1.3. Topografía

Como elementos importantes de considerar destacan la pendiente (%) y longitud de la misma, en general se presentan cuatro categorías desde los rangos 0-15 %, 16-30%; 31 – 60% y mayores de 60%. En cuanto a la longitud de la pendiente en el terreno y grado de impacto, se presentan cortas e irregulares (quebrada) de menor impacto, cortas y uniformes; largas e uniforme y de mayor impacto es larga y uniforme (Lewis y Carr, 1989). En la figura 1 es posible observar la participación del bosque nativo según tipo de pendiente y su distribución regional, donde es se destaca la alta participación bajo un 45 % de pendiente.

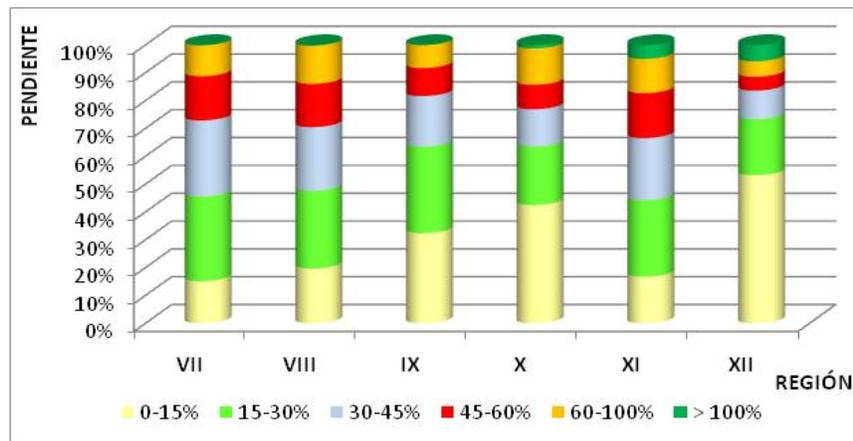


Figura 1: Distribución de los bosques nativos por regiones y grado de pendiente (modificado del Catastro CONAF_ CONAMA)

La pendiente es la mayor fuente de impacto o fuente de erosión dentro de las variables del sitio (Rice *et al.*, 1981), en general podemos indicar que la mayoría (70%) de los bosques nativos en Chile se encuentran baja 45% y que se encuentran bajos los 400 msnm (figura 2).

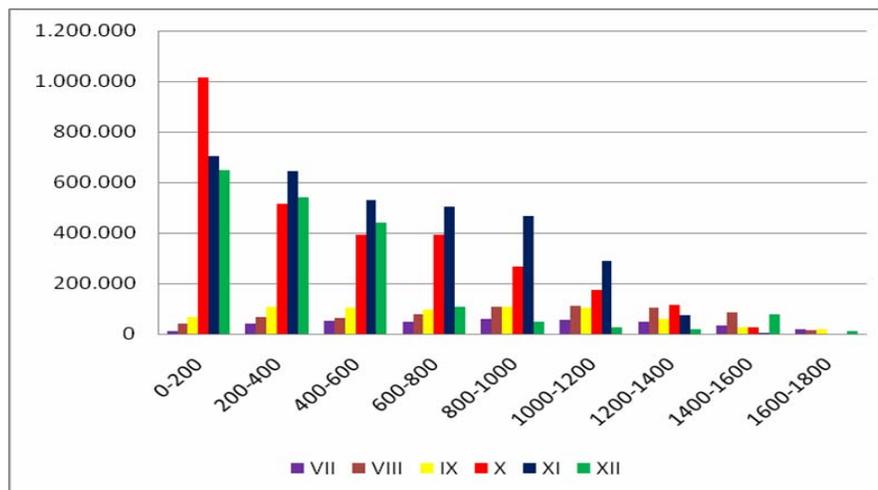


Figura 2: Distribución del bosque nativo por regiones y altitud (modificado del Catastro CONAF_ CONAMA)

3.2.2. Factores del Manejo Forestal

El efecto del maderío con equipos un tractor pequeño y la densidad del suelo fue estudiado por Amaranthus, *et al.* (1997) en suelos volcánicos caracterizado por un bajo contenido orgánico del suelo y una alta densidad del suelo. Los niveles de compactación fueron medidos antes de cosecha y después de una vuelta, 3 vueltas, y 6 vueltas por tractor. La densidad del suelo superficial (10 cm) y subsuperficie (20 cm) después de 3 y 6 vueltas fue más alta que antes de la

cosecha. Este estudio confirma que la compactación debido al madereo ocurre durante las primeras vueltas.

Para determinar el impacto producido en la cosecha a tala rasa con tractor y torre, se evaluaron las condiciones edáficas y densidad de la superficie (0 – 5 cm) en varios suelos. La alteración fue separada en 4 clases de alteración. Los dos métodos resultaron en la misma proporción del área poca alterada y área altamente alterada sin importar la clase del suelo (23 y 9% respectivamente). Sin embargo el área cosechada por tractor mostró 3 veces más extensión compactada que el área cosechada por torre (27 % en comparación con 9 %) y una reducción en la superficie no alterada (36 % para tractor y 57 % para torre). La densidad del suelo de áreas pocas alteradas y áreas pre cosecha fue la misma. Los valores para las clases de áreas altamente alteradas y compactadas fueron significativamente más altos, indicando una reducción en porosidad. La compactación por tractor resulta en un aumento de erosión sin embargo estos efectos negativos pueden estar minimizados si las pendientes no son mayores que 20 – 30 % y las huellas de madereo se ubiquen por los contornos (Dyrness, 1965).

Los efectos de cosecha terrestre por maquinaria y cosecha por torre fueron evaluados en bosques de pino oregon de suelos derivados de toba volcánica. La sedimentación por cosecha terrestre por maquinaria fue 100 veces mayor que sedimentación proveniente de áreas sin alteración. Sedimentación proveniente de áreas cosechadas por torre fue 3 veces mayor sedimentación que en áreas sin alteración. La mayor causa por la sedimentación fueron originados por derrumbes donde se construyeron caminos, específicamente donde se cruzaron cauces de agua (Fredricksen, 1970).

Froehlich y colaboradores (1980) examinó el impacto de carguío sobre 4 distintos suelos: franco arenoso, franco gravilla arenoso, franco arcilloso gravilloso, y franco, con 3 distintos tipos de maquinas: skidder con neumático, tractor, y vehículo de torsión de suspensión. La densidad del suelo aumentó rápidamente durante los primeros pasos. Seis vueltas con cualquier maquina produjeron 60% del cambio total después de 20 vueltas. Para los 4 tipos de suelo el aumento de densidad del suelo superficie (primeros 20 cm) después de 20 vueltas fue: 16 % con tractor, 11 % con skidder con neumático, y 9 % con un vehículo de torsión de suspensión. El cambio de la densidad después de 20 vueltas con el tractor fue acompañado por una reducción de 43 % de porosidad y 78% reducción en capacidad de infiltración y un 67% reducción de infiltración con los otros dos maquinas.

En el noroeste California se evaluaron las condiciones de erosión en 102 sitios cosechados, la cantidad de erosión fue afectada por el método de cosecha, pendiente, y tipo de suelo. El promedio de la erosión fue 26,8 m³/ha (Rice and Datzman, 1981). La erosión generada por los distintos métodos de madereo (torre y tractor) fueron asociado con una diferencia de 3,7 veces,

tipo de suelo (geología) 13,5 veces, y pendiente 16 veces. El análisis sugiere que una fuente de variación adicional fue operativa, relacionado al método. Investigaciones en el futuro se debe tomar en cuenta más las operaciones y menos las diferencias entre los sitios (Rice, R.M. and P.A. Datzman. 1981).

3.2.2.1. Tipo y Descripción de Maquinaria de Cosecha

En pendientes pronunciadas (en general, > 35% de pendiente) son comunes en países industrializados, el uso de los helicópteros y los sistemas de extracción con cable. Los árboles pueden ser talados y transportados con suspensión total a través de un helicóptero o un sistema de cable. Una variante de la torre de maderero con suspensión total, es el sistema de cable de tierra, uno de los extremos el trozo o árbol suspendido y el otro extremo se deslizándose sobre el terreno a una zona de acopio.

En pendientes menos fuertes (por lo general <35% de pendiente) se utiliza el skidders de ruedas u orugas. El maderero carga y traslado, generalmente, lleva los árboles a una zona de acopio en una sola operación. Las huellas de maderero del Skidder son la principal causa de perturbación de la cobertura del suelo y la compactación del suelo mineral.

El volteo del árbol por sí misma no causa una erosión significativa, y las operaciones de extracción maderera, por lo general, causan menos erosión por unidad de área de caminos forestales, pero la zona de extracción maderera es por lo general grande en relación a los caminos, aunque la erosión total de las operaciones de extracción maderera puede aproximarse al de los caminos forestales (Megahan, 1986).

La disminución del número de árboles se traduce en una disminución de la evapotranspiración, lo que contribuye al aumento de flujo subsuperficial, caudal, y canalizar la erosión. La investigación sobre el terreno ha constatado que el aprovechamiento de la madera tiende a compactar el suelo. La compactación aumenta la erosión del suelo y afecta de forma negativa a la productividad de los bosques (Yoho, 1980). La mayoría proviene de la erosión de las huellas de maderero, debido a la reducción de las tasas de infiltración y perturbación de la capa orgánica (Robichaud *et al.*, 1993b). Por lo tanto, la aceleración de la erosión causada por el aprovechamiento de la madera puede producir un deterioro de propiedades físicas del suelo, pérdida de nutrientes, flujo y degradación de la calidad del agua por los sedimentos, herbicidas, y los nutrientes (Douglas y Goodwin, 1980).

Forest Practices Board (2000) determinó el tipo de maquinaria forestal que es recomendable utilizar en la cosecha foresta de acuerdo a la clase de erodabilidad y el grado de pendiente (ver cuadro 4). La erodabilidad está influida principalmente para las propiedades del de textura,

densidad, estructura y estabilidad de los agregados (Swanson, 1974 citado por Gayoso y Alarcón,1999).

Cuadro 4: Pauta para la operación de maquinaria de cosecha según nivel de erodabilidad y su contenido de humedad.

Clase de Erodibilidad del Suelo	Pendiente Mayoritaria (o más frecuente)							
	Plano-undulado 0 - 11°		Accidentado 12 - 19°		Pendiente 20 - 26°		Pendiente 27 - 35°	
	Seco ⁽⁴⁾	Mojado ⁽⁴⁾	Seco	Mojado	Seco	Mojado	Seco	Mojado
Bajo	C1-5	C1-5	C1-5	C1-5	C1-5	C3-5	C4-5	C4-5
Moderado	C1-5	C1-5	C1-5	C1-5	C1-5	C4-5	C5	C5
Moderado/Alto	C1-5	C1-5	C1-5	C2-5	C5	C5	NC ⁽³⁾	NC ⁽³⁾
Alto	C1-5	C2-5	C1-5	C3-5 ⁽²⁾	C5 ⁽⁶⁾	C5 ⁽⁶⁾	NC ⁽³⁾	NC ⁽³⁾
Muy Alto	C1-5	C4-5	C5	C5 ⁽²⁾	NC ⁽³⁾	NC ⁽³⁾	NC ⁽³⁾	NC ⁽³⁾
Suelos de baja capacidad de cargar presión	C1-5	C2-5	C1-5	C3-5	C1-5	C3-5	C4-5	C4-5

Nota:

²El límite de cosecha terrestre debe ser 14° pendiente en bosques secos con suelos arenosos graníticos.

³NC = No cosechar

⁴En áreas cársicas la cosecha terrestre estará limitada a los pendientes menos de 20°. En suelos cársicos vulnerables la cosecha estará limitada a cosecha por torre cuesta arriba en pendientes mas de 9°. No cosecha estará permitida en sitios con pendientes mayores de 20°.

⁶Un límite de 22° debe ser aplicado.

Nota:

C-1: Skidders convencionales incluyendo forwarders con neumático estándar

C-2: Equipo de alta flotación y baja presión sobre el suelo. Sistemas que usan cadenas en neumáticos y reducen la presión sobre el suelo.

C-3: Equipos con zapatas anchas y flexibles. Rodillos montados sobre barras de torsión distribuyen la carga.

C-4: Torres de madereo con arrastre del trozo o árbol.

C-5: Torre de madereo con suspensión total de trozo o árbol.

Presiones aproximadas para las clases de maquinaria de cosecha forestal.

Clase de maquina	C-1	C-2	C-3	C-4-C-6
Presión p.s.i.	> 6	3-6	<3	-
kPa	> 40	20-40	<20	-

3.2.2.2 Preparación del suelo y Sistema y diseño de los caminos

La cosecha en si suele tener impactos menores sobre la calidad del suelo y la productividad a largo plazo. La compactación del suelo durante la cosecha puede degradar la calidad del suelo, sin embargo el subsolado durante la preparación del sitio puede restaurar las propiedades del suelo a los niveles de pre cosecha. Prácticas de la preparación del sitio que eliminan cantidades grandes de contenido orgánico y suelo superficial pueden tener impactos perjudiciales, mayormente en suelos arenosos. La fertilización puede mejorar las condiciones del suelo por aumentar la producción de raíces gruesas. Estos cambios pueden mejorar la calidad del suelo y la productividad del sitio al largo plazo (Fox, 2000).

Las posibilidades que ofrece la planificación de operaciones con respecto a ciertas restricciones que determinan los suelos, consideran la intensidad, estándar y localización de los caminos forestales; el tamaño y forma de la unidad de cosecha; la oportunidad en el año y período de corta y de madereo; la selección del sistema, equipo y procedimiento de madereo y transporte.

En cuanto al suelo, resultan efectivas medidas tales como la planificación de las vías de saca, lo que conduce a una menor cantidad de superficie alterada por el tránsito de las máquinas. Si se asocia a equipos de baja presión básica al suelo se disminuirá también la intensidad de la compactación (ver cuadro 4). Es adecuado además diseñar los caminos de madereo evitando la máxima pendiente, sin movimiento de tierras. Una vez terminada la intervención, éstos se cortarían transversalmente de tal forma de impedir la socavación por agua. También se tratará de favorecer la reimplantación de la vegetación en las áreas compactadas. El efecto de la planificación de la red de huellas de madereo fue examinado en comparación al sistema sin planificación en rodales de pino oregon de 35 - 40 años. El sistema de planificación redujo el área impactada con suelos compactados en dos tercios en comparación al sistema convencional (Froehlich, *et al.*, 1981).

El diseño y construcción de los caminos debe considerar medidas mitigadoras, las que comprenden evitar los trazados en áreas de fragilidad muy alta o con pendientes fuertes, disminuir tanto como sea posible el movimiento de tierras, disminuir el ancho de la plataforma, evitar la construcción de caminos en las franjas de filtraje, disminuir el volumen y velocidad del agua en las cunetas, disminuir los ángulos de los taludes de corte, colocar camellones de filtraje sobre los taludes de terraplén, estabilizar mecánica y biológicamente los taludes, recubrir cunetas cuando se superen las pendientes críticas de socavación, compactar y mantener las carpetas de rodado. Considerar en todos los caminos la adecuada canalización de las aguas y localizar las descargas de cunetas y alcantarillas que sean necesarias de construir, con el fin de dar una salida rápida al agua y evitar la acumulación de grandes volúmenes que tienen una mayor fuerza erosiva.

4. ESTUDIO DE CASO Y ASPECTOS OPERACIONALES

En una cuenca hidrográfica se distinguen tres zonas: la acuática, la ribereña y las tierras altas. La zona acuática comprende el cauce y el área del lecho que normalmente está bajo agua incluida el área bajo la marca de aguas "vivas". La zona ribereña está entre la acuática y tierras altas y es un área de vegetación influenciada por la cercanía del agua (Gayoso y Gayoso, 2003 y Managing Riparian Zones, 1995).

Para proteger recursos acuáticos valiosos de los impactos potenciales del uso humano adyacente, hay acuerdo substancial en la comunidad científica sobre el valor de usar franjas de amortiguamiento en la zona ribereña, constituida por vegetación inalterada a la que se le denomina, Vegetación Ribereña o Zona Buffer. Hay también acuerdo general respecto del amplio rango de beneficios que constituyen las zonas ribereñas cuando está constituida de vegetación natural, como bosques. Sin embargo, hay a menudo poco acuerdo y mucho debate en la investigación respecto de cuál es el mejor nivel de la protección necesaria y cuál es el delineamiento recomendable para el manejo de una zona ribereña. De todas las preguntas relacionadas con el uso práctico de estas zonas, la determinación del ancho mínimo apropiado es ciertamente lo que más se discute.

Uno de los factores importantes que determina la eficacia de una zona ribereña es su tamaño o ancho efectivo. Las zonas ribereñas que son demasiado estrechas pueden poner en riesgo la calidad del agua del lugar o los recursos acuáticos, pudiendo también presentar problemas con la sustentabilidad en el largo plazo. Aunque casi siempre se considera mejor, las zonas ribereñas más anchas de lo que se necesita, ellas pueden restringir innecesariamente el uso de una porción de la tierra en la producción del sitio. Por lo tanto, la necesidad de determinar anchos "mínimos" ha sido un punto importante de las instituciones publico-privadas que se relacionan con el recurso agua.

En este sentido, la incorporación de herramientas informáticas como es el caso de la utilización de Modelos de Simulación Hidrológica, cobra importancia en la comprensión de los procesos que ocurren en un área determinada.

4.1. Modelación hidrológica

4.1.1. Área de estudio Cuenca Quitratue

La simulación hidrológica fue realizada en la cuenca "Quitratue" de 789,1ha, ubicada en el sector noroeste del río Puyehue, en la Novena Región, Chile. Esta cuenca, es una subcuenca y forma parte de un sistema mayor que da origen a la cuenca "Puyehue" de 14.890 ha, y es más pequeña aún si se la compara con la cuenca del Río Cruces (Figura 3), pero que sin embargo

para efectos de la simulación resulta perfecta en términos de características geográficas, de uso de suelos y de la capacidad informática con que se cuenta para realizar este trabajo.

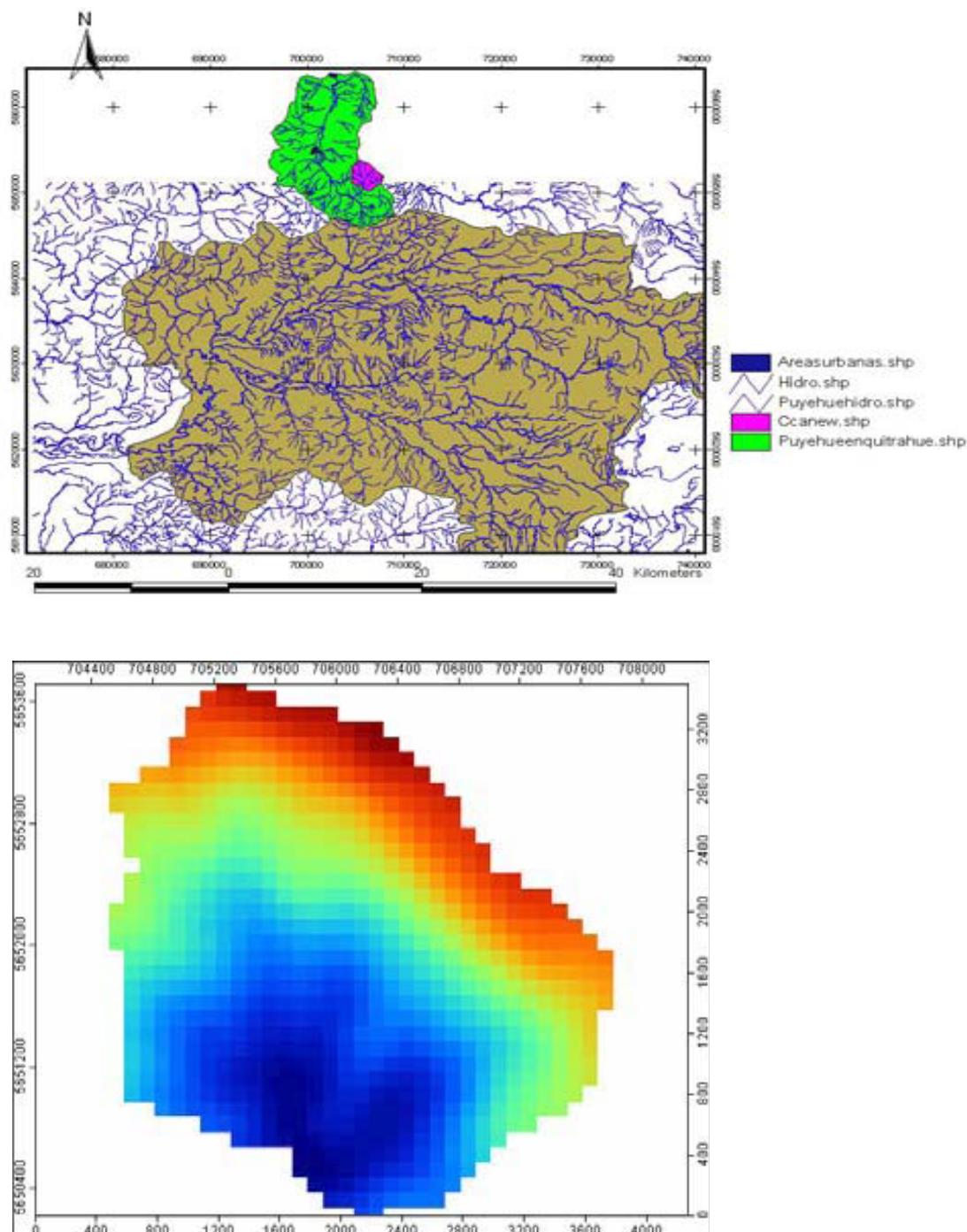


Figura 3: Mapa de ubicación y forma de la cuenca Quitratue.

El sitio presenta un clima templado cálido lluvioso con influencia mediterránea: Este tipo climático se encuentra en la IX y X regiones, desde la cuenca del río Cautín hasta el norte de la

ciudad de Puerto Montt. Se caracteriza por presentar precipitaciones a lo largo de todo el año aunque los meses de verano presentan menor pluviosidad que los meses invernales. El mes más frío tiene una temperatura media comprendida entre 18°C y -3°C , y la media del mes más cálido supera los 10°C . Las temperaturas no sufren una gran variación por latitud, siendo la unidad térmica y lo poco significativo de las oscilaciones, una notable característica de este clima.

El uso de suelo en esta cuenca está compuesto por áreas de bosque nativo, plantaciones y praderas (789,1 ha). En el caso de la simulación se tomó como supuesto la existencia sólo de área de bosque nativo (567 ha) y praderas (222 ha), lo que constituye un 71,9 y 28,2 % respectivamente (Figura 4). El tipo de suelo que se ha considerado para hacer la simulación, se consideró un suelo Trumao en toda la cuenca.

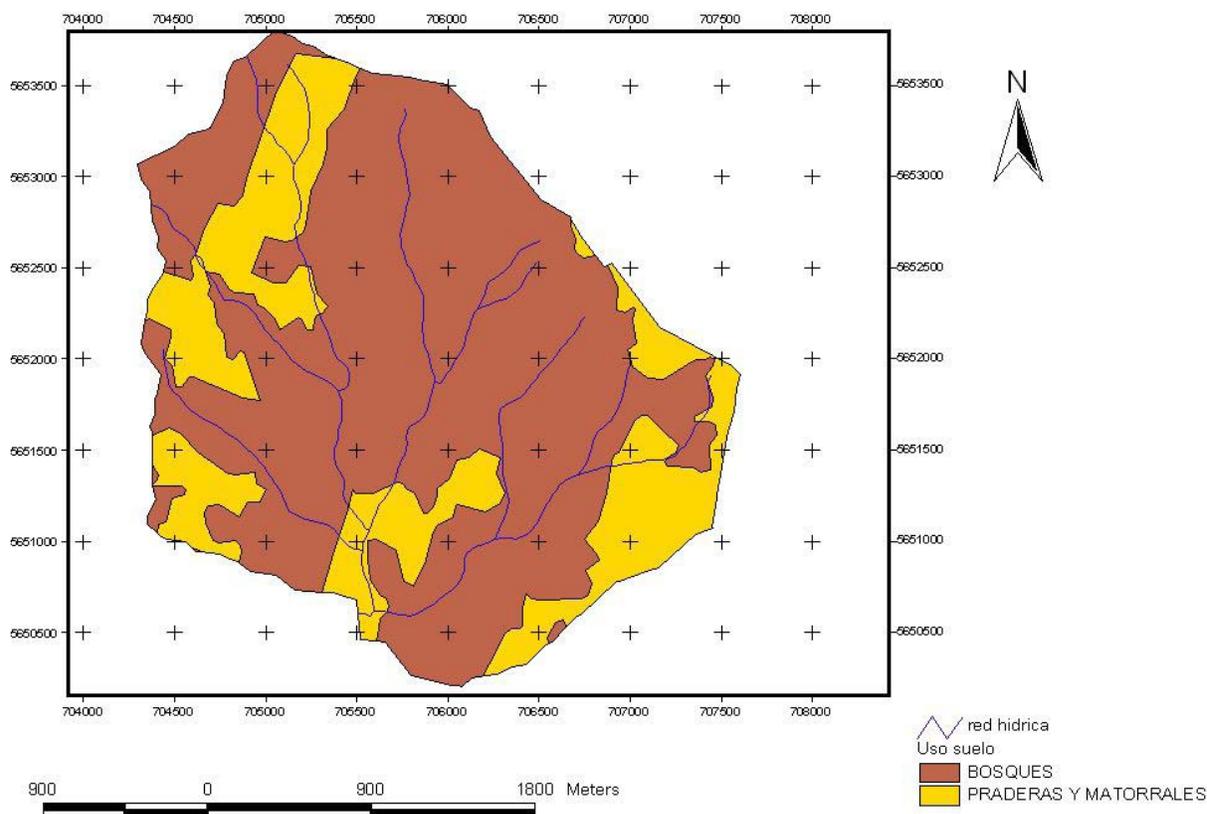


Figura 4: Distribución del uso de suelo en la cuenca Quitratue.

4.1.2 Recopilación de antecedentes

Para realizar las simulaciones, se trabajó con información digital de la cuenca generada de cartografía a escala con cotas cada 100 metros e información sobre precipitaciones y temperatura a niveles diarios. La información digital ha permitido generar coberturas del modelo de elevación digital (DEM), red de drenaje, además de los tipos y usos de suelo. La información de precipitación consideró dos años de precipitaciones, que corresponden a niveles de precipitación normal, los que se utilizaron para calibrar el modelo.

4.1.3 Escenarios supuestos

El modelamiento consideró la simulación de los cauces con el uso actual de suelo para calibrar y validar el estudio. Una vez completada esta etapa, se trabajó con tres supuestos en los anchos de las zonas de protección de cauce (10, 20 y 30m) de cada lado en la red hídrica compuesta por vegetación ribereña boscosa nativa (Figura 5), modelando además toda la cuenca con una cobertura de praderas como uso de suelo, para obtener mayor contraste en los resultados, y el mismo periodo de precipitaciones.

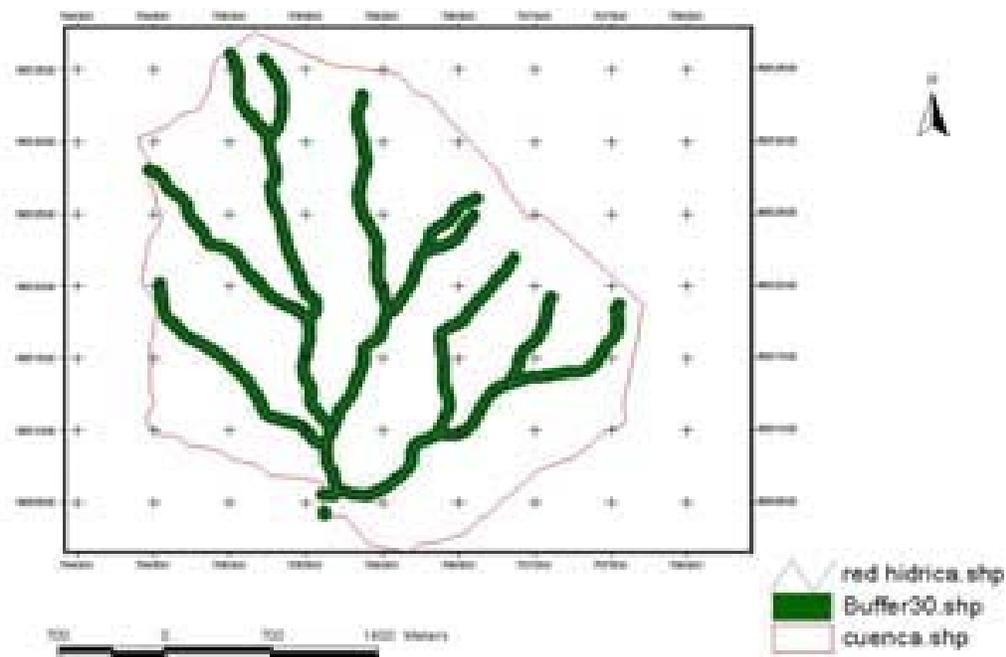


Figura 5: Escenarios supuestos para el ancho de las zonas buffer.

4.1.4. Pre-procesamiento

Antes de iniciar las simulaciones fue necesario hacer una evaluación de los datos de entrada para verificar las posibles incertezas en los datos observados, lo que pudiera ir en desmedro de las evaluaciones posteriores al momento de determinar si el modelo funciona o no correctamente. Es decir, lograr determinar la existencia de valores que escapan excesivamente del comportamiento que presenta el sitio en general u otras deficiencias similares que puedan estar asociadas a algún tipo de error de medición fácilmente detectable (por ejemplo, años donde la escorrentía supere las precipitaciones registradas).

4.1.5 Modelo de simulación WaSiM-ETH:

En este estudio, se utilizó un modelo determinístico con una estructura modular (Figura 6), apoyado en una combinación de aproximaciones físicamente-basadas y modelo conceptual que sigue paso a paso las simulaciones que simplifica las aplicaciones para escalas temporal (intervalos de minutos o días) y espacial (cuencas pequeñas y grandes). La dimensión espacial está representada en el modelo usando un sistema con celdas del mismo tamaño sobre la cuenca a estudiar.

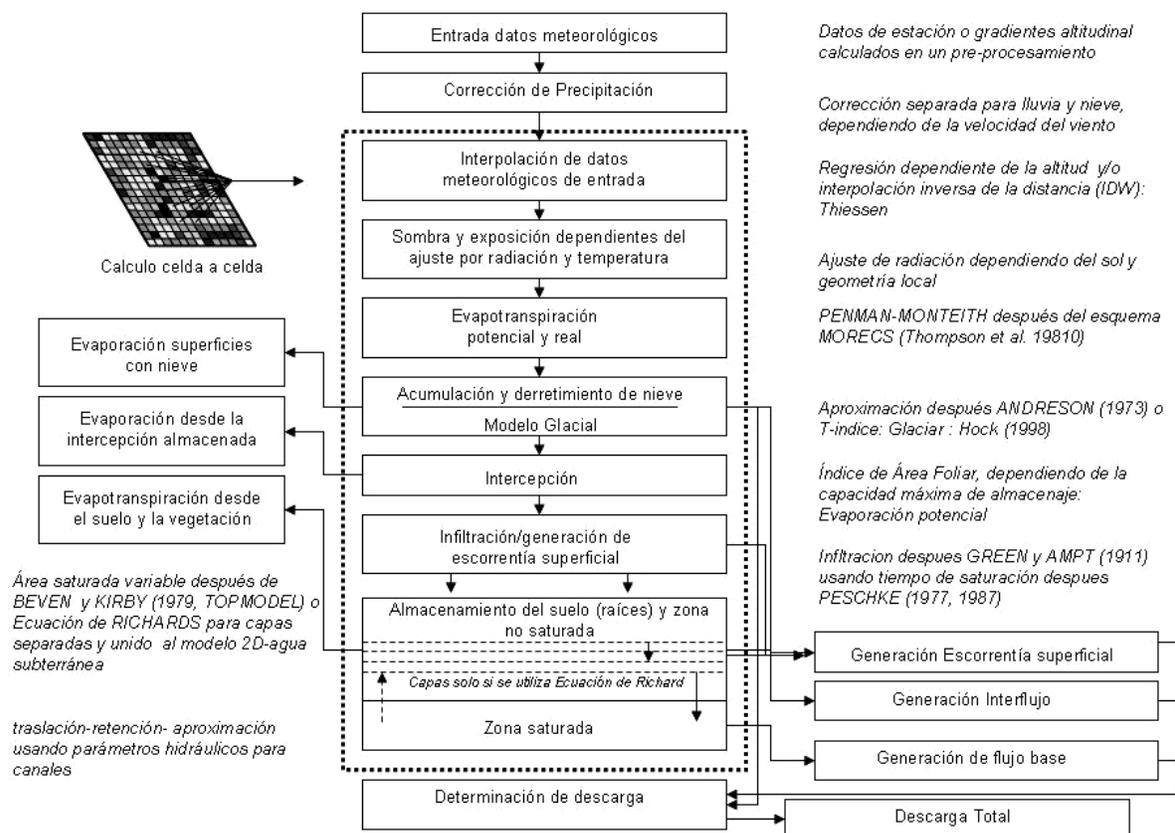


Figura 6. Modelo de simulación WaSiM-ETH.

4.1.6 Descripción de los módulos del modelo WaSiM:

Corrección de precipitación: Dentro de las rutinas, existe un pre-procesamiento de datos, una corrección separada para lluvia y nieve, dependiendo de la velocidad del viento. La diferenciación entre lluvia y nieve, está dada por el umbral de temperatura.

Interpolación de datos meteorológicos de entrada: El modelo WaSiM-ETH, ofrece muchos métodos de interpolación para los datos meteorológicos (temperatura o precipitación), entre ellas destacan interpolación inverso a la distancia, por regresión dependiente de la altitud, considerando también estas dos posibilidades (Inverso a la distancia y regresión) y con polígonos de Thiessen.

Ajuste dependiente de la topografía de la radiación y temperatura. Los impactos de la topografía sobre la radiación y la temperatura del aire son considerados utilizando el esquema de OKE (1987).

Evapotranspiración: En el caso de evapotranspiración potencial, el modelo considera tres posibilidades de su determinación, ellas son: Aproximación de Penman-Monteith (Monteith, 1975; Brutsaert, 1982), aproximación de Wendling (1975) y la posibilidad de estimación con la fórmula de Hamon (Federer y Lash, 1983), estas dos últimas posibilidades de estimación son aplicables sólo si se utiliza un periodo de tiempo de un día o más.

Cálculo de Evapotranspiración real: dependiendo de la versión WaSiM-ETH utilizada (versión Topmodel o versión Ecuación de Richards), la evapotranspiración real se determina en el primer caso como una función de reducción relativamente simple de la evaporación potencial consiguiendo la evapotranspiración real. La reducción de la evaporación real es semejante a la evaporación potencial si el contenido de humedad del suelo almacenado cae bajo de un nivel especificado. En el segundo caso, la determinación de la Evapotranspiración real, se utiliza la relación entre el contenido de humedad del suelo y la presión capilar actual.

Acumulación y derretimiento de nieve (Modelo Glaciar): El tipo re-precipitación está estimado para cada celda, utilizando aire y temperatura interpolados durante el evento.

Intercepción: Se utiliza una aproximación simple con una capacidad dependiente del Índice de área foliar (LAI), grado de cobertura vegetal y la altura máxima de agua en las hojas.

Infiltración: es una parte integrada del modulo de suelo. Utiliza un acercamiento a la propuesta de de Peschke (1977, 1987) que se basa en el acercamiento de Green y de Ampt (1911). El suelo se asume como homogéneo y el flujo mátrico sin capas se asume como dominante, el frente

húmedo se aproxima como una función de paso. La intensidad de precipitación se asume constante durante todo el paso del tiempo. La aproximación consiste en dos fases: en la primera fase el tiempo de saturación es calculado, mientras que en la segunda fase, la infiltración acumulada es calculada. Si la superficie del suelo esta satura al final del periodo, en la próxima vez que el paso sólo la infiltración acumulada será calculada (si la intensidad de la precipitación es suficientemente alta) sin calcular los tiempos de saturación. La cantidad excedente (agua no infiltrada) es escorrentía superficial. Usando un parámetro α la cantidad de agua re-infiltrada puede ser controlada (0.. 1). Esto puede ser importante al considerar las características del suelo no homogéneas, si se utiliza celdas más grandes, por ejemplo en tamaños de celdas de algunos cientos de metros).

Módulo de suelo, utilizando la aproximación Topmodel: este modulo está basado en la distribución espacial del índice topográfico. Usando este índice, el grado potencial de las áreas de saturación se puede estimar dependiendo del déficit medio de saturación en la cuenca.

Módulo de suelo, utilizando la aproximación de la Ecuación de Richards: utiliza esta ecuación para modelar los flujos dentro de la zona no saturada del suelo. El modelamiento es unidimensional en la dirección vertical usando un suelo dividido en varias capas.

Irrigación: Presenta posibilidades de modelar la irrigación usando el agua superficial así como el agua subterránea. También es posible considerar la acumulación de agua, de drenaje artificial y de capas de arcilla dentro del suelo.

El modelo WaSiM-ETH, presenta la posibilidad de subdividir las cuencas con formatos de entrada y salida de datos y con estructura de archivo control. Una de las principales características de este modelo, se centra en la base física de muchos de sus componentes, que pueden ser aplicados a varias cuencas en un amplio rango de condiciones medio ambientales en el mundo. Además, los datos internos como la humedad del suelo, de agua subterránea, o el equivalente de agua-nieve, pueden ser una ventaja en el proceso de calibración. Su aplicación práctica se puede dar en una serie de pasos y en un primer paso, la calibración puede ser corrida para los parámetros más importantes en las subcuencas. Los parámetros más importantes son usualmente los necesarios para el módulo de suelo. El próximo paso puede ser la calibración de otros parámetros menos importantes.

Este modelo, necesita de datos que cumplan satisfactoriamente en calidad y cantidad. Precisa de algunos requerimientos mínimos para poder hacer correr las diferentes rutinas. Como lo explican Schulla y Jasper (2000), los módulos para las rutinas de interceptación, nieve, infiltración y escorrentía, pueden ser requeridos durante la ejecución del modelo. Sin embargo, si es sólo la

escorrentía superficial la que va a ser modelada, entonces los datos de precipitación, modelo de elevación digital, uso de suelo y tipo de suelo son necesarios para iniciar la modelación.

Así, para una simulación óptima de larga duración y alta resolución, todos los componentes deben ser descritos. Comparando las configuraciones mínimas, aquí son mucho más los datos requeridos; luego, la parametrización y la calibración son más complejos.

Al iniciar la simulación los datos espaciales son importantes, a ellos, se les efectúa una transformación espacial (Datos raster, grillas), y se realizan diversos cálculos de exposición, pendiente, dirección de flujo, acumulación del flujo, flujo neto, límites de la cuenca, factor topográfico, además del Índice de Área Foliar. El formato de datos espacialmente distribuidos generalmente tiene un tamaño de celda que debe ser transformado en formato binario (lenguaje interno del modelo). Como una precondition, todos los datos de entrada requieren un tamaño de celda uniforme para el procesamiento. Para los datos temporales como es el caso de los climatológicos, son importantes los valores de la estación con una determinada resolución de tiempo (temperatura, radiación, velocidad del viento, humedad, presión del aire, duración del día).

4.1.7. Producción de sedimentos y generación de escorrentía:

4.1.7.1 Parcelas de escorrentía

El estudio se ha realizado en una microcuenca forestal experimental, ubicada al norte de la ciudad de Valdivia. La cuenca posee una pendiente media de 26,7%, ubicada entre los 114-220 (msnm), con una densidad de la red de drenaje de 3,3 km km⁻² (Boix, 2007).

El clima corresponde al tipo templado lluvioso con influencia mediterránea y precipitación anual que fluctúa entre los 1600 y 3200, concentrándose en los meses de mayo y agosto el 70% de la precipitación anual (Boix, 2007).

La descripción realizada por Uyttendaele, 2000, la temperatura media anual se ubica entre 11 y 12°C. La diferencia entre la máxima y mínima media anual normalmente no sobrepasa 10°C. Debido a la regulación térmica ejercida sobre esta zona por el océano, las temperaturas medias anuales y semanales son considerablemente estables.

Los suelos son rojo-arcillosos derivados de cenizas volcánicas del Pleistoceno, depositados sobre complejo metamórfico de la Costa. En general, son suelos con alta profundidad efectiva (80-100cm), de textura fina, alta porosidad y buena estructura que permite una adecuada tasa de infiltración de agua, aireación y drenaje (IREN, 1978) que a pesar de su alto contenido en arcillas

(40-45%) se comporta como limo debido a su agregación (Iroumé, 1990). El agua que infiltra en el suelo se mueve principalmente en los horizontes superficiales (IREN, 1978). En general son suelos ácidos a moderadamente ácidos donde la materia orgánica es alta en horizontes superficiales y va disminuyendo gradualmente en profundidad. A medida que la cantidad de materia orgánica aumenta, se observa una mayor porosidad total, una menor densidad aparente del suelo y un aumento de la cantidad de agua aprovechable. También a medida que aumentan las cantidades de arcilla, hay un aumento en la porosidad total (Arcauz y Herrera, 1978).

La vegetación de la zona corresponde a bosque Valdiviano costero, bosque siempre verde (Fuenzalida, 1965). La cuenca alcanza una superficie de 94.2 ha dividida en tres tipos de uso de suelo: plantaciones, renovales y terrenos de protección de cauces. Los cuadros 4 y 5 muestran algunas características de las coberturas presentes en la cuenca, Los renovales y zonas de protección de cauce, ocupan más de la mitad de la superficie de la cuenca (58%). La composición florística del bosque nativo está compuesta de las siguientes especies: *Nothofagus dombeyi*, *Nothofagus oblicua*, *Drimys winteri*, *Eucryphia cordifolia*, *Myrceugenia* sp. (Mirtaceas), *Aextoxicon punctatum*, *Chusquea quila*, *Fuchsia magellanica* (chilco), *Ugni molinae* (murta), epifitas y otras especies trepadoras. Respecto a las plantaciones, el 45% corresponde a coníferas, de ellas el 99% es *Pinus radiata*, y las restantes son *Pinus muricata* y *Cupressus lusitanica*. Existe también un 38% de mezcla de eucaliptos (*Eucaliptus globulus* y *Eucalitus nitens*), 16% de *Nothofagus alpina* y 1% de *Acacai melanoxylon*.

Cuadro 5: Uso del suelo en la cuenca Los Pinos (Fuente: Boix, 2007).

Uso	Superficie (ha)	%
Sup. Renoval	34	36
Sup. Plantación	37.15	39
Sup. T. Protección	22	23
Superficie Total	94.2	100

Cuadro 5. Plantaciones por especies en la cuenca Los Pinos (Fuente: Boix, 2007).

Plantaciones	Superficie (ha)	%
Coníferas	16.5	45
Eucaliptos	14.1	38
<i>Acacai melanoxylon</i>	0.3	1
<i>Nothofagus alpina</i>	5.8	16
Superficie Total	36.7	100

4.1.7.2 Estructura de registro del sitio de estudio

Estructuras de registro: Las estructuras de registro que proporcionan los datos básicos necesarios para analizar la producción de sedimentos y escorrentía, están constituidas por un pluviógrafo, estructura para el registro de escorrentía total de la microcuenca y una bomba de agua controlada mediante un sistema de limnígrafo y monitoreada por un almacenador de datos (datalogger). Cada cierto tiempo una cantidad de agua es bombeada a medida que el nivel de agua varía. Esta información se transmite hacia el datalogger, que almacena los datos de manera continua.

Parcelas de escorrentía: Las parcelas de escorrentía, como lo menciona Stolzenbach (1998), constituyen el único sistema que permite medir con inobjetable exactitud el monto de suelo perdido, así como las cantidades de agua que escurren en un terreno dado. Teniendo un número adecuado pueden representar acertadamente factores como pendiente, tipo de suelo, cubierta vegetal, prácticas culturales y otros.

En este sentido, con la finalidad de evaluar el escurrimiento superficial, se instaló tres parcelas en la parte baja de la ladera (A, B y C) con características superficiales distintas. El sector fue sometido a cosecha forestal, dejando el suelo desprovisto de cobertura vegetal. Las parcelas B y C conservan una franja de zona de protección de cauce de 3 y 6 m respectivamente, más la misma superficie de la parcela A con una pendiente hacia el cauce de entre 17 - 22°. Todas ellas con repeticiones para garantizar la confiabilidad de los datos, la parcela A que no conservó la zona de protección de cauce y con 10 metros de largo, se utilizó como testigo.

La delimitación de los costados y de la parte superior de cada parcela se hizo con latones (Figura 7), enterrados en forma vertical para confinar el escurrimiento e impedir el ingreso de agua del área vecina. En la parte inferior de las parcelas se instaló una canaleta de recepción, para recibir el agua que escurre superficialmente por la ladera y la conduce a los sistemas de almacenamiento y registro. El material residual de la cosecha, como se señaló anteriormente, fue removido previo a la instalación de las parcelas.

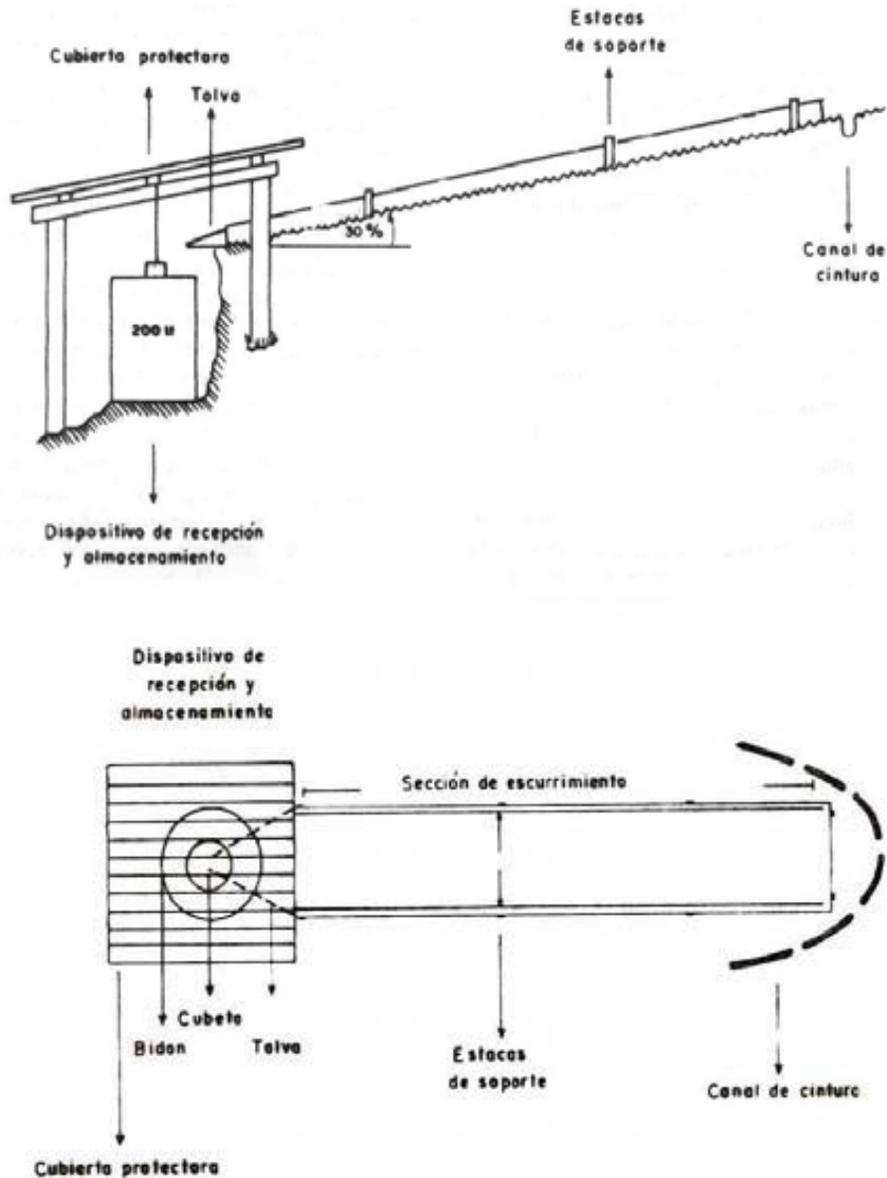


Figura 7: Esquema de una parcela de escurrimiento (vista lateral y de planta). Adaptado de Ibarra *et al.* s/f.

4.1.7.3. Registro de escorrentía

Para medir la escorrentía que se produce en cada parcela en un evento de precipitación, el agua que escurre hasta la canaleta colectora ubicada en la parte más baja de la parcela, es conducida a por un tubo de PVC a un recipiente de decantación, donde se retiene el material más grueso que es transportado por el agua. Este depósito está unido mediante otra tubería a un equipo de registro, especialmente diseñado y construido para este estudio.

Los equipos se resguardan en una caseta construida en una excavación de forma tal que el agua que escurre por la ladera pueda entrar a los tambores habilitados para tal efecto.

El equipo de registro se compone de un recipiente principal (tambor) que recibe el agua de escorrentía superficial de cada parcela. Las partículas mayores arrastradas por el agua, son retenidas en el estanque de sedimentación.

La variación temporal del nivel agua de los estanques, se almacenó en un registrador de datos ubicado en el interior de cada una de las casetas. Este dispositivo permite determinar la cantidad de agua que escurre superficialmente por la parcela durante cada lluvia. Cada 15 días o después de ocurrido un evento de precipitación importante, y de acuerdo a la autonomía de los equipos se rescató la información almacenada en la memoria. Paralelamente se registran los montos de agua caída y sus respectivas intensidades.

También en cada ciclo de vaciado del depósito, parte del agua acumulada se almacena en un depósito adicional para analizar posteriormente en laboratorio la cantidad de sustancias en suspensión dentro de los tambores receptores. La toma de muestras de sedimentos, se realizó periódicamente recolectando el material sólido retenido en las canaletas de recepción, estanque de retención y en el depósito de sedimentación.

Los sedimentos recogidos de los diferentes depósitos fueron deshidratados en estufa hasta peso constante y pesados.

Los valores de escorrentía generados por la precipitación se analizaron a escala diaria. Transformando la información almacenada en cada registrador de datos a mm de escorrentía.

Se determinó las posibles diferencias en la escorrentía generada en cada una de las parcelas como resultado de la influencia o no de la franja de la zona de protección de cauce en diferentes períodos de tiempo.

Estimación de las pérdidas de suelo en parcelas de erosión: Para la cantidad de suelo erosionado R (kg ha^{-2}), se aplicó la metodología utilizada por Mancilla (2006).

Los montos de pérdidas de suelo obtenidos mediante las parcelas de erosión, se analizó por tratamiento y entre tratamientos; se comparó las tasa promedio para cada situación para verificar la importancia de la cubierta vegetal y verificar además si las diferencias entre las erosiones por cada situación son o no estadísticamente significativas.

4.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2.1. Modelación hídrica

Datos requeridos por el modelo: La configuración del modelo se detalla en la Tabla 6. En ella se encuentran los datos de entrada requeridos para las corridas del modelo. Fueron utilizados los requerimientos mínimos de los componentes del modelo (módulos) y los datos de entrada según el objetivo planteado.

Cuadro 6: Datos requeridos, modelo WaSiM-ETH.

Configuración del modelo	
Clasificación del clima	Templado lluvioso con influencia mediterránea
Tamaño de la cuenca	789,1 ha
Uso de la Tierra	Agrícola y forestal
Tipo de suelo	Trumao
Objetivo	Simulación de escorrentía bajo diferentes anchos de zonas buffer
Módulos del modelo	Modulo de suelo, corrección de Precipitación, Evapotranspiración,
Resolución del modelo	Escala temporal: 24h
	Periodo de simulación: 2004-2005
Set de datos observados	Precipitación, temperatura, caudal
Requerimientos de las grillas	Modelo de elevación digital, uso de suelo, tipo de suelo, índice topográfico

Generación de caudales: La simulación en el escenario de uso actual de suelo, y en el periodo de tiempo seleccionado, el caudal medido, y su relación con las precipitaciones, se grafican en la Figura 6.

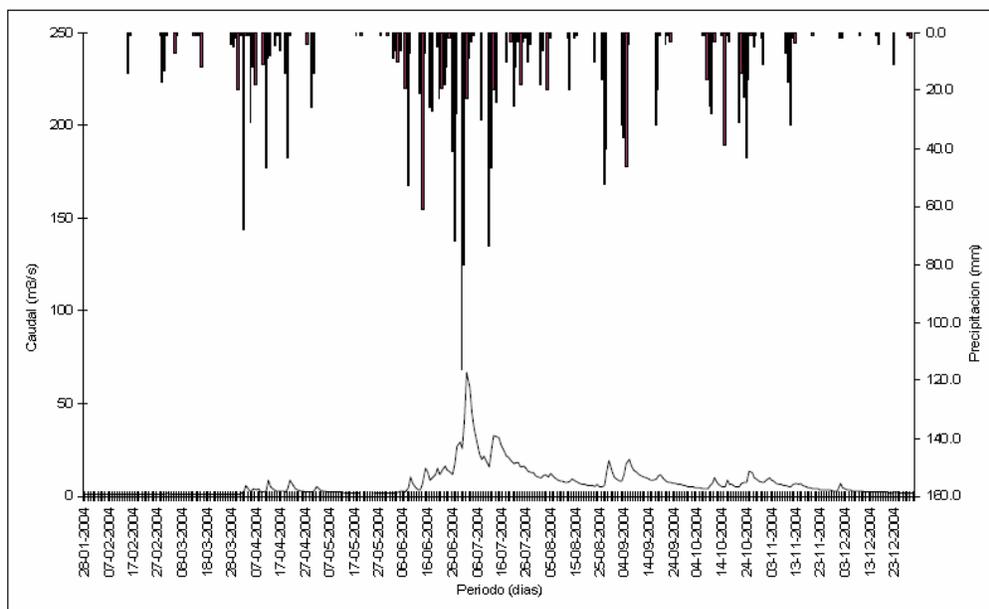


Figura 6: Relación entre caudal observado y simulado

De la figura se puede determinar que los caudales medios suceden cuando las precipitaciones son mayores y concentradas en los meses de mayo a agosto. La precipitación acumulada en el periodo de estudio fue 2147.0 mm.

Al hacer las simulaciones correspondientes a los distintos escenarios propuestos los resultados en términos de escorrentías mensuales fueron los siguientes (Tabla 7).

Cuadro 7: Escorrentías bajo tres supuestos de anchos en las zonas buffer.

Mes	Precipitación (mm)	Escorrentía (mm)		
		ZPC-10	ZPC-20	ZPC-30
Enero	14.00	1.37	1.38	1.38
Febrero	16.22	1.05	1.05	1.05
Marzo	65.04	1.18	1.18	1.19
Abril	300.40	2.17	2.19	2.21
Mayo	42.85	1.36	1.37	1.38
Junio	473.99	289.89	283.93	271.30
Julio	516.00	478.62	472.61	459.78
Agosto	189.00	169.96	169.87	169.66
Septiembre	179.00	160.17	160.34	160.72
Octubre	253.45	206.43	206.36	206.21
Noviembre	73.05	48.74	48.73	48.70
Diciembre	24.00	1.73	1.72	1.70
Total	2147.00	1362.66	1350.71	1325.27

Como se observa a partir de la modelación, que los resultados son bastante similares aun cuando se logra vislumbrar una diferencia y disminución de la escorrentía según se aumenta el ancho en la zona buffer. En este sentido, las zonas buffer moderan los flujos de la escorrentía ante eventos extremos de precipitación. La vegetación forestal natural ayuda a reducir los efectos en sentido descendiente de inundaciones disipando energía de la corriente, temporalmente almacenando las aguas de la inundación, y ayudando a quitar cargas de sedimento. En un sitio dado, la zona buffer es eficaz en disminuir el régimen de escorrentía, aumentando la infiltración, si embargo en este estudio esa disminución sólo se observa en la comparación de los tres escenarios en los anchos de las zonas buffer, donde a mayor ancho la escorrentía producida es menor.

Los bosques almacenan alrededor de 40 veces más agua que un campo cosechado y 15 veces que una pradera. Estos aumentos en almacenaje son en gran parte debido a la capacidad del bosque de capturar la precipitación en el área superficial de las hojas, de los troncos y ramas; del material orgánico almacenado en el piso del bosque y en el suelo; y de la mayor capacidad de evapotranspirar. Los bosques se están evaluando más con frecuencia en su rol sobre la reducción del volumen del agua o producción de agua en el manejo de una cuenca.

4.2.2. Parcelas de escorrentía

Escorrentía superficial: La cantidad de escurrimiento superficial total en las parcelas B y C, fueron más o menos 30 y 40% menores que la parcela A (parcela control si franja de zona buffer), sin presentar diferencias estadísticamente significativa a un nivel de confianza de 95%.

La tendencia de la escorrentía en las tres parcelas es aumentar de forma directamente proporcional a la precipitación, es decir, a mayor precipitación, la escorrentía también es mayor. Sin embargo, al comparar los valores de la escorrentía entre parcelas, ésta tiende a disminuir en la medida que aumenta la participación de la zona “buffer”, siendo la escorrentía de la parcela A, siempre mayor con relación a las parcelas B y C respectivamente.

Esta disminución de la escorrentía en las parcelas B y C con relación a la escorrentía de la parcela A, se debe según Deletic (2001) citado por Zamora (2003) a que la elevada rugosidad de la zona “buffer” disminuye la velocidad del flujo superficial y favorece la infiltración del agua.

Esta disminución de las escorrentías acumuladas en cada una de las precipitaciones acumuladas para cada etapa del estudio, es debido a la influencia que ejerce la zona “buffer”. Se hace evidente que mientras mayor sea la longitud de zona “buffer”, menor es la escorrentía que se genera.

Efecto de la zona “buffer” en la escorrentía: En general durante el período de estudio, la escorrentía en zonas buffer de 3 y 6 metros fueron alrededor de 50 y 60% menores respectivamente que en suelos desprovistos de protección. Sin embargo, al comparar las escorrentías entre las parcelas con zona “buffer”, es evidente que ella es menor en la parcela con una mayor longitud de zona “buffer”. La tendencia sugiere que si se incorpora una franja aun mayor la escorrentía se reduciría aún más.

Los resultados encontrados en el presente estudio confirman los resultados de Zamora (2003), Hengchaovanich (1999) y Castro *et al.* (1998), quienes encontraron que la zona “buffer” reduce la escorrentía. Confirman también que la según sea el tipo de cobertura vegetal desde hierbas, arbustos o bosques, se tendrá una cierta rugosidad que permitirá o no disminuir la velocidad del flujo superficial y favorecer la infiltración del agua que escurre por entre la zona “buffer”.

Pérdida de suelo

La cuantificación de pérdida de suelo para el período de estudio, se relacionan con la cantidad de material recolectado en las canaletas de sedimentación.

Se observa que la pérdida de sedimento total acumulada fue alrededor de 900, 370 y 210 kg/ha para las parcelas A, B y C respectivamente. Las pérdidas totales en las parcelas B y C fueron menores que las pérdidas de la parcela A.

La tendencia de la pérdida de sedimentos para cada parcela en comparación al aumento de la precipitación es directamente proporcional. Sin embargo, la pérdida de sedimento disminuye en relación directa a la condición de cada parcela. Es evidente la influencia que ejerce la zona “buffer” en la disminución de la pérdida de sedimentos.

Al hacer una evaluación dentro de la zona buffer, en las parcelas B y C, se observó que la máxima erosión neta producida por las parcelas, queda retenida ya en el primer metro de zona buffer, más específicamente a 1.67m. Esto fue verificado con un estudio adicional en las mismas parcelas, utilizando clavos de erosión lo que permitió determinar la redistribución del suelo.

4.3. Conclusiones y Consideraciones Finales

Como se planteó, este estudio corresponde a una etapa de aplicación de las herramientas de simulación hidrológica sobre una cuenca. Este modelo precisa de un cuidado particular en las variables de entrada para mejorar la estructura espacial y temporal de los procesos hidrológicos. En este caso, se utilizó los requerimientos mínimos para hacer correr el modelo, los que sin duda influyen sobre los resultados obtenidos y la sensibilidad del modelo.

Las propiedades del suelo y en consecuencia, las simulaciones de caudal, están estrechamente relacionadas. Es necesario entonces, fijar claramente las condiciones iniciales de contenido de humedad y las propiedades hídricas del suelo. Los resultados obtenidos en este modelo sin duda se podrán mejorar, ya que la técnica de modelación será probablemente una herramienta avanzada en la simulación y pronóstico de los procesos hidrológicos en el futuro. En el estado actual de la investigación son necesarios mayores esfuerzos, en particular hacia una mejor consistencia de los resultados de simulación.

La presencia e influencia de la zona buffer es importante dentro de una cuenca. Estas zonas pueden afectar el cauce y su estabilidad principalmente ejerciendo una influencia relativamente mayor en cauces pequeños más que en ríos grandes, los contaminantes que ingresan al sistema junto con la incorporación de sedimentos, la duración y magnitud de las inundaciones, pudiendo influir también sobre el hábitat para plantas acuáticas y terrestres, y animales (Managing Riparian Zones, 1995).

Para determinar el efecto del ancho de la zona buffer sobre la producción de escorrentía y sedimentos, es necesario tener en consideración, el tipo de cobertura vegetal, el ancho de la zona buffer y la ubicación de estas zonas dentro de la cuenca. Un ejemplo de esto es que en algunas ocasiones la ubicación de zonas buffer en altas pendientes logrará disminuir la producción de escorrentía más que si se le ubica en áreas bajas, lo mismo para el caso de la producción de sedimentos. Muchas de las condiciones que prevalecen en un sitio determinado

a lo largo de un río reflejarán los procesos que ocurren aguas arriba. Así, influenciando ríos de zonas bajas a través del manejo ribereño requiere a menudo que las condiciones aguas arriba, sean manejadas. Por ejemplo, los sustratos de cauces aguas abajo pueden ser influenciados en parte por la erosión y el transporte de suelos aguas arriba, lo mismo que las temperaturas pueden estar influenciadas por la sombra ribereña de los sitios más altos. El manejo de la luz en un del río requiere el manejo de la zona ribereña inmediatamente adyacente. Las zonas ribereñas a lo largo de los cauces también proporcionan una importante cobertura y hábitat para peces y aves.

Uno de los factores importantes que determina la eficacia de una zona ribereña es su tamaño o ancho efectivo (Chesapeake Bay Program, 1998). Las zonas ribereñas que son demasiado estrechas pueden poner en riesgo la calidad del agua del lugar o los recursos acuáticos. Pueden también presentar problemas con la sustentabilidad en el largo plazo. Aunque casi siempre se considera mejor, las zonas ribereñas más anchas de lo que se necesita, pueden restringir innecesariamente el uso de una porción de la tierra en la producción. Por lo tanto, la necesidad de determinar anchos "mínimos" ha sido un punto importante de las instituciones publico-privadas que se relacionan con el recurso agua.

En términos simples, las zonas buffer adecuadas pueden ser más pequeñas si están diseñados correctamente y mantenidos en buenas condiciones. Por lo tanto, las zonas buffer con un buen manejo (por ejemplo, vegetación nativa densa, suelos imperturbados, comunidad microbiana sana) es probable que proporcionen una variedad de funciones suficientemente eficaz.

Como se señaló al inicio del texto, la modelación hidrológica es una herramienta más en el conjunto de posibilidades existentes para llegar a tomar decisiones en el ámbito del manejo a nivel de cuencas hidrográficas. Existe un sinnúmero de distintos modelos de simulación con diferentes grados de dificultad que permiten acercarse a la obtención de los distintos resultados en términos de escorrentía y producción de sedimentos. Existen además otras herramientas informáticas que permitirían determinar las distintas zonas en estudio generando mapas de susceptibilidad a la erosión, tal es el caso del programa ArcView que posee extensiones de erosión y que genera estos mapas. Lo mismo si se aplica la Formula Universal de Pérdida de Suelo (USLE), se podría generar mapas de riesgo por zonas, como se ha hecho en distintos lugares del mundo.

5. NIVELES DE EROSIÓN Y DE APORTE DE SEDIMENTOS

Tradicionalmente en los estudios de erosión se ha puesto más énfasis en los efectos que se producen en el sujeto pasivo de la erosión, es decir, en el propio suelo que en los efectos derivados de la exportación del material desagregado.

Desde el punto de vista del conocimiento de los procesos involucrados es lógico comenzar y profundizar en los mecanismos del fenómeno *in situ*, para entre otras cosas, poder predecir un determinado comportamiento. Sin embargo desde el punto de vista de gestión es preciso tener en cuenta los efectos que se producen fuera de la zona concreta que está sometida a un determinado proceso de erosión.

En el cuadro 8 se indican algunos efectos que se producen en el suelo (directos) y otros efectos que son consecuencia de los anteriores (indirectos). Los primeros pueden resumirse como pérdida de cantidad, calidad y fertilidad del suelo. Esta pérdida puede tener importantes connotaciones ecológicas y económicas por sus repercusiones en la disminución de la productividad agrícola y forestal.

Cuadro 8: Efecto directos e indirectos de los procesos de erosión hídrica el suelo (Morgan, 1995).

Directos	Indirectos
<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de horizontes humíferos. • Pérdida de materia orgánica. • Pérdida de nutrientes. • Pérdida de la fracción químicamente activa. • Debilitamiento de la estructura. • Disminución del espesor efectivo. • Disminución de la capacidad de infiltración. • Disminución de los intercambios gaseosos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación de aguas superficiales y subsuperficiales. • Aterramientos en zonas agrícolas. • Colmatación de presas hidráulicas. • Impactos en la infraestructura de comunicaciones. • Desafíos en las redes de canales y acequias de regadío.

La cobertura vegetal, cuando cubre una proporción suficiente de la superficie del suelo, jugar un papel importante en la reducción de la erosión. La cubierta forestal es la más efectiva pero una densa cubierta herbácea puede tener casi la misma eficacia y se obtiene más rápidamente. Para una protección adecuada, al menos el 70 % de la superficie del suelo debe estar cubierta (Elwell y Stocking, 1976 citado por Morgan, 1995), aunque se puede obtener una protección aceptable con el 40 % del suelo cubierto (Morgan, 1995).

Otro aspecto a considerar en la definición de tolerancia de pérdida de los suelos se presenta en la figura 7, en ella se aprecia que a igual severidad de pérdida de suelo se observa que la tasa diferencial de degradación de suelo debido a tasas iguales de erosión es mayor en el suelo tipo C, ello cobra especial importancia en o suelos descubiertos del secano costero de la VII región y en la Región de Aysén.

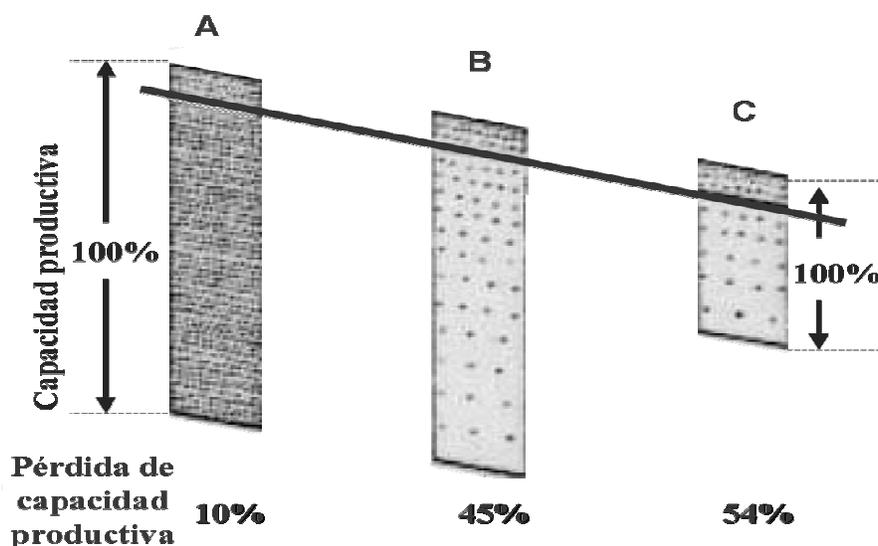


Figura 7: Pérdida de capacidad productiva a igual severidad de pérdida de suelo (Casanova, 2008).

5.1. Pérdida y Formación de Suelo

La pérdida de suelo se expresa, habitualmente, en unidades de peso o volumen por unidad de superficie y tiempo (ton/ha/año). En una revisión realizada por (Morgan, 1995) sobre la erosión en condiciones naturales, Young (1969) entrega valores de 0,0045 ton/ha para aéreas de relieve moderado y 0,45 ton/ha para relieves escarpados. En cambio, para tierras agrícolas estas cifras varían entre 45 a 450 ton/ha (ver cuadro 9). Teóricamente, se juzga la severidad de la pérdida de suelo relacionándola con la velocidad de formación del suelo.

En Chile, Honorato y colaboradores (2001), realizaron una búsqueda de información indicando que Millas (1977), estimó la erosión en 8,8 y 9,9 ton/ha/año en dos series de suelos graníticos en Cauquenes (rotación de papas, trigo y avena asociada a pradera) y que Riquelme (1994), en esta misma serie de suelo, la estimó en 8 ton/ha/año, con un cultivo de trigo y Labranza Tradicional. Endlicher (1988) en Florida, en parcelas de trigo de secano para el período 1982-1983, registró valores de erosión de 3,2 a 3,8 ton/ha/año. Estos valores coinciden con los encontrado con Honorato *et al.*, (2001), en un suelo desnudo ubicados entre la VI a IX región, la

perdida por erosión fluctúa entre 25 a 45 ton/ha/años (ver anexo1) y que suelo cubiertos con praderas las perdida fluctúa entre 0,8 a 2 ton/ha/año.

Cuadro 9: Velocidad de formación y pérdida de suelo

Velocidad de Formación y Pérdida de Suelo		Valor Medio	Fuente
Formación	EEUU	0,1 mm/año	Zachar, 1982
Formación	EEUU nordeste	0,1 mm/año	Kirby 1980
Formación	EEUU Llanuras (Suelos Loess)	0,2 mm/año	Kirby 1980
Formación	EEUU Zonas Áridas Sudeste	0,02 mm/año	Kirby 1980
Formación	Reino Unido (UK)	0,1 mm/año	Evans 1981
Pérdida	Kenia Zonas Áridas	0,1 y 0,02 mm/año	Dunne,et.al., 1978
Pérdida	Kenia Zonas Semiáridas	0,01 mm/año	Dunne,et.al., 1978
Formación	Islandia (F)	0,05 y 0,15 mm/año	Johannesson, 1960
Formación	EEUU	0,3 y 2 ton/ha (para la mayoría de los casos bajo 1 ton/ha)	Alexander 1988
Perdida	Centra Grecia	2 a 4 ton/ha (peso seco)	Dimoyiannis, 2001
Perdida	Santa Bárbara (VIII Región)		Ibarra, R. 1977.
	Suelo Desnudo	12 mm/año	
Perdida	Suelo con Trigo	2 mm/año	Ibarra, R. 1977.
	Rapelco (VIII Región)		
Perdida	Suelo Desnudo	26 ton/ha	Ibarra, R. 1977.
	Suelo con Trigo	5,8 ton/ha	
Perdida	Cosecha forestal a tala rasa y quema de residuos (VIII Región)	1,89 a 3,12 ton/ha (Pendiente 8 a 18%)	Gayoso y Alarcón, 1999

Nota: Densidad aparente 1 t/m^3 , esto sería equivalente a $0,1 \text{ mm/año}$.

El nivel de tolerancia teórica que implica determinar la intensidad de erosión del suelo que iguala a su velocidad de formación, no es posible en la práctica determinarla (Morgan, 1995). La pérdida tolerable de suelo debe definirse como la tasa máxima de erosión permisible para que la fertilidad del suelo pueda mantenerse durante un periodo de tiempo (p.e. 20 – 25 años). En este caso una pérdida media anual del suelo de 11 ton/ha se considera generalmente aceptable aunque, en condiciones particularmente sensibles, como ocurre en los casos de suelos superficiales o altamente erosionables, se recomiendan valores bajos como 2 ton/ha (Hudson, 1981).

En conservación de suelos, es normal planificar para una tasa de erosión de 0,2 a 1 mm/año desde la superficie. Se asume que esta tasa se mantendrá en equilibrio con la tasa de meteorización química que forma un nuevo suelo. A nivel de predios en suelos Franco, profundo, fértil en EEUU se han detectados tasas de 0,6-1,1 mm/año y el suelos delgado, altamente erosionable 0,2-0,5 mm/año (Casanova, 2008, http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias_agronomicas/c20034416352_con_tolerancia.pdf).

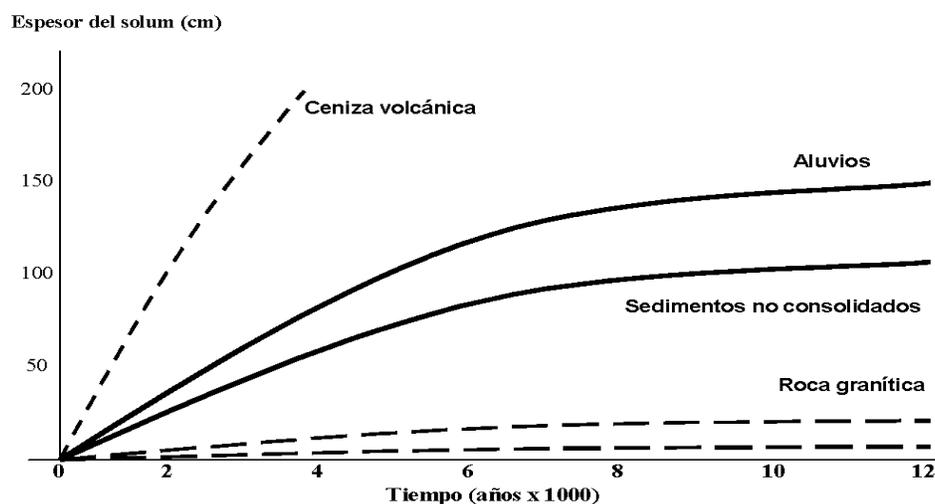


Figura 8: Tasa de formación de suelos sobre varios materiales parentales (Casanova, 2008)

Estudios realizados por Alvarez (1988) estima que el proceso erosivo en los suelos de Chile en ambiente de montaña parte o inicia con una lluvia diaria superior a 12 mm y 10 ° de pendiente. Investigaciones de Oyarzún (1993) en la cuenca de Picoiquén situada en la vertiente oriental de la cordillera de Nahuelbuta, al NNW de Angol (VIII Región), han demostrado que la vegetación y la cobertura del suelo son los principales factores que controlan la pérdida de suelo y que factores asociados al tipo de sustrato pueden ser de menor importancia. Se determinó que en el año 1993 el área de trabajo, el 54% de la cuenca estaba cubierta con bosque nativo. Oyarzún evaluó los efectos del uso del suelo y especialmente de las plantaciones forestales sobre el escurrimiento superficial, erosión y transporte de sedimentos, en suelos derivados de rocas metamórficas entre los años 1991-1992. Los tratamientos comparados fueron:

- tala rasa sin residuos/quemadas,
- tala rasa con residuos y
- parcelas de control no alteradas bosque nativo

Los resultados señalan unos incrementos significativos de las pérdidas de suelo en el tratamiento sin residuos/quemadas, en una proporción de 32:1 y de 14: 1 respecto de las parcelas con residuos/Control. Oyarzún (1993) determinó que la pérdida de suelos sin residuos

es 77 veces más alta que en un área con cubierta vegetal nativa, la pérdida de suelo sin residuos fue de 6,7 ton/ha/año (uso forestal radiata), y con residuos fue de 3,4 ton/ha/año, mientras que para el control fue de 0,086 ton/ha/año.

Según Gayoso y Alarcón (1999) el valor de tolerancia considerado para las alteraciones del suelo forestales es de 2 ton/ha/año, el cual corresponde al valor teórico de compensación por procesos naturales de meteorización del suelo.

5.2 Pérdida Tolerable de Suelo

Un aspecto discutible es, lo que se considerará como aceptable en relación con la pérdida de erosión. Para Wischmeier y Smith (1978), una pérdida tolerable de suelo es la tasa máxima de erosión que aún permite la sustentabilidad económica a largo plazo del nivel de productividad del suelo, por su parte Miller (citado por Oyarzún, 1993), sostiene que las pérdidas por erosión a largo plazo no deberían exceder la tasa de formación del suelo.

La tolerancia a la pérdida de suelo es la cantidad de tierra que, expresada en toneladas por unidad de superficie y año, puede perder un perfil edáfico manteniendo su nivel de productividad actual durante un largo periodo de años (FAO, 1967). La tolerancia refleja la máxima pérdida de suelo admisible con un grado de conservación tal que mantenga una producción económica similar, con los medios técnicos disponibles en la actualidad. (http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Documentos_Tecnicos/Usos_y_erosion/PDFs/338_351.pdf).

La tolerancia a la pérdida de suelo depende de las propiedades del suelo en sí mismo, de la profundidad, topografía y erosión precedente sufrida (ver figura 7). Se han efectuado progresos diversos en la determinación de la intensidad de la erosión en numerosos suelos y en muy diferentes medios climáticos. Para Estados Unidos, se han dado cifras que oscilan entre 5 y 12,5 ton/ha/año, según los tipos de suelo, su profundidad y propiedades físicas (Wischmeier y Smith, 1978).

Generalmente se ha venido admitiendo que una pérdida de 12,5 ton/ha/año, es el máximo aceptable para suelos bastante profundos, permeables y bien drenados. Pérdidas de 2 a 4 ton/ha/año han sido también consideradas como admisibles para suelos con un subsuelo desfavorable y que presenten escasa profundidad. A pesar de estas cifras orientativas no parece aconsejable establecer unos límites fijos de tolerancia para los suelos, por muy semejantes que estos sean, ya que la intensidad de erosión en ellos puede variar grandemente en función del medio en que se encuentran.

En cuadro 10 aparecen resumidos y relacionados con la profundidad útil del perfil los valores medios de tolerancia según los distintos métodos empleados. Así, los valores utilizados en Estados Unidos como tasas asimilables por suelos con profundidad < 25 cm, resultan ser los 2,2 ton/ha/año). Los suelos de profundidad entre 25-50 cm, los valores convencionales hablan de tolerancias de 4,5 ton/ha/año. Con sustrato desfavorable los datos en Estados Unidos hablan de cifras de 2,2 ton/ha/año. Para suelos con profundidad moderada (50-100 cms) los resultados medios sobre suelos con sustrato favorable (6,7 ton/ha/año), son similares a los encontrado en suelos españoles [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques Tematicos/Publicaciones Divulgacion Y Noticias/Documentos Tecnicos/Usos y erosion/PDFs/ 338 351.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Documentos_Tecnicos/Usos_y_erosion/PDFs/338_351.pdf).

Cuadro 10: Guía para valores de tolerancia de pérdidas de suelo para distintas profundidades de raíces.

Profundidad de Raíces (cm)	Valores de Tolerancia de Pérdida de Suelo (ton/ha/año)	
	Suelo con Sustrato favorable	Suelo con sustrato desfavorable
0 - 25	2,2	2,2
25 - 50	4,5	2,2
50 - 100	6,7	4,5
100 - 150	9,0	6,7
> 150	11,2	11,2

La profundidad efectiva de las raíces es un indicador importante de la productividad del suelo y este puede ser estimado de las características del suelo (Groenevelt *et al.*, 1984) además varía entre las especies de cultivos (Taylor y Terrel, 1982).

Las tasas de erosión tolerables para un suelo renovable en EEUU, se encuentran entre 5 a 12,5 ton/ha/año (Wischmeier y Smith, 1978). Estos autores lo describen como la cantidad de pérdida de suelo tolerable como un valor significativo de los niveles máximos de erosión en los suelos. Esto permitiría una alta productividad en los cultivos para que sean económicamente e indefinidamente sostenibles. Los factores más importantes que determinan el límite de 5 a 12,5 ton/ha como pérdida de suelo tolerable son: profundidad, propiedades físicas y otras características que afectan el desarrollo de las raíces, prevención de cárcavas, problemas de sedimentación en el campo, perdidas de las semillas, reducción de la materia orgánica en el suelo y pérdida de los nutrientes (Wischmeier y Smith, 1978).

Cuadro 11: Riesgos de erosión en toneladas por hectárea por año y su equivalencia en milímetros por año Geler *et al.*, 2000).

Riesgos de Erosión		Pérdida de suelo (ton/ha/año)	Pérdida de suelo (mm/ha)
1	Muy bajo	0 – 2	0-0,15
2	Bajo	2 – 5	0,15 – 0,38
3	Tolerable	5 – 10	0,38 – 0,77
4	Alto	10 – 20	0,77 – 1,54
5	Muy alto	> 20	> 1,54

Para la conversión de la cantidad de pérdida de suelo en unidades de peso (ton/ha) a unidades de longitud (mm), fue utilizado el valor promedio de la densidad de masa del suelo como una constante $1,3 \text{ g/cm}^3$ (Marshall, 1996). La densidad de masa del suelo se define como la proporción de masa de la parte sólida seca del volumen de masa del suelo constituido por los sólidos secos. Este valor de la densidad de masa fue transformado a 1.300 kg/m^3 que se ajusta más a las operaciones en el cálculo de las pérdidas de suelo en milímetros (Geler *et al.*, 2000).

Los rangos de tolerancia para pérdida de suelo varían desde 11 ton/ha/año para suelos profundos, permeables y bien drenados con alto nivel productivo a 2 ton/ha/año para suelos delgados (Guevara, 1997). De los antecedentes obtenidos en diferentes fuentes parece razonable aplicar una combinación entre profundidad del raíces (suelo) y tolerancia de perdida.

Cuadro12: Relación entre profundidad de raíces y tolerancia de pérdida de suelo en áreas forestales.

Profundidad de Raíces (cm)	Valores de Tolerancia (ton/ha/año)
0 – 25	2,0 – 2,2
25 - 50	2,2 - 4,5
50 - 100	4,5 - 6,7
100 - 150	6,7 - 9
> 150	11,0

6. BIBLIOGRAFIA

1. **AMARANTHUS, M. P.; STEINFELD D. E.** 1997. Soil compaction after yarding of small-diameter Douglas-fir with a small tractor in southwest Oregon. Res. Pap. PNWRP-504. Portland OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 7 p.
2. **DYRNESS, C.T.** 1965. Soil surface condition following tractor and high-lead logging in the Oregon Cascades. *J. Forestry* 63: 272-275.
3. **AMARANTHUS, M. P.; STEINFELD, D.E.** 1997. Soil compaction after yarding of small-diameter Douglas-fir with a small tractor in southwest Oregon. Res. Pap. PNWRP-504. Portland OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 7 p.
4. **CHESAPEAKE BAY PROGRAM, 1998.** Chesapeake Bay Riparian Handbook: A guide for establishing and maintaining riparian forest buffer. USDA Forest Service.15 p.
5. **CASANOVA, M. 2008:** http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias_agronomicas/c20034416352_con_tolerancia.pdf.
6. **CURRAN M.P., HENINGER R.L., MAYNARD D G., AND POWERS R. F.:** 2005: Harvesting effects on soils, tree growth, and long-term productivity. *Productivity of Western Forests: A Forest Products Focus, Chapter One.*
7. **ELLIOT WILLIAM J., D. PAGE-DUMROESE, AND P. R. ROBICHAUD,** 1999: <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/cgi-bin/engr/library/searchpub.pl?pub=1999c>.
8. **FOREST PRACTICES BOARD,** 2000: Forest Practices ode, Forest practices Board, Hobart, Tasmania.
9. **GAYOSO, J. ALARCÓN, D.,** 1999: Guía de Conservación de suelos Forestales.
10. **GAYOSO J. Y GAYOSO S.** 2003. Diseño de zonas ribereñas, requerimiento de un ancho mínimo. Facultad Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. 12p
11. **GELLER R. T., LIGTENBERG, A. AND A. DE BY R.:** modelo para el pronóstico de la dinamica de erosión en los suelos debido a los cambios en el uso de la tierra.
http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=508.
12. **GURTZ, J.; ZAPPA, M.; JASPER, K.; LANG, H.; VERBUNT, M.; BADOUX, A. Y VITVAR, T.** 2003. A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments. *Hydrological Processes* 17, 297-311
13. **HAAN, C.; JOHNSON, H.; BRAKENSIEK, D.** 1982. Hydrologic modeling of small watersheds. ASAE.St. Joseph, Michigan, U.S.A.533p.

14. **HONORATO, R. BARRALES, L. PEÑA, I. Y BARRERA F. 2001: EVALUACION DEL MODELO USLE EN LA ESTIMACION DE LA EROSION EN SEIS LOCALIDADES ENTRE LA IV Y IX REGION DE CHILE.** *Cien. Inv. Agr.* 28(1): 7-14. 2001
15. **LANDSCHAFTSÖKOLOGE UND UMWELTFORSCHUNG** 38, 142-155
16. **LOUSIER, D. J. 1990:** Impacts of Forest Harvesting and Regeneration on Forest Sites. Interior Forest Harvesting Committee and British Columbia Ministry of Forests. Land management report. No. 67.
17. **FREDRICKSEN, R.L. 1970:** Erosion and sedimentation following road construction and timber harvest on unstable soils in three small western Oregon watersheds. USDA For. Serv., Pac. NW For. Range Exp. Sta., Portland. OR. Res. Paper PNW-104. 15p.
18. **FROELICH, H.A., D.E. AULERICH, AND R. CURTIS. 1981.** Designing skid trail systems to reduce soil impacts from tractive logging machines. Oregon State Univ., School For., Corvallis, OR. Res. Paper 44.15 p.
19. **FROELICH, H.A., D.W.R. MILES, AND R.W. ROBBINS. 1985.** Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1015-1017.
20. **FROELICH, H.A., J. AZEVEDO, P. CAFFERATA, AND D. LYSNE. 1980.** Predicting soil compaction on forested land. Forest Engineering Dep., Oreg. State Univ., Corvallis, OR. Unpubl. Proj. Summary. 3 p.
21. **Fox, T. 2000.** Sustained productivity in intensively managed forest plantations. *Forest Ecology and Management* 138: 187-202.
22. **OYARZUN, C, 1993:** Estimación de los procesos de erosión hídrica en un ambiente montañoso de la cuenca de Bio-Bio, VIII región; Chile. Tesis doctoral Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, Concepción.
23. **PAGE-DUMROESE, D. 1993.** Susceptibility of Volcanic Ash-Influenced Soil in Northern Idaho to Mechanical Compaction. United States Department of Agriculture Forest Service Intermountain Research Station. Research Note INT-409. 5pg.
24. **MANAGING RIPARIAN ZONES, 1995.** Managing riparian zones: A contribution to protecting New Zealand's rivers and streams. Wellington, N.Z.: Dept of Conservation. 16p.
25. **NIEHOFF, D.; FRITSCH, U.; BRONSTERT, A. 2002.** Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *Journal of Hydrology* 267, 80-93.

26. **PIEPHO, B. 2002.** Evaluation of the hydrological behavior in a small catchment by using the model WaSiM. A case study within the IPMS-Project in Nepal.
27. **PROCEEDINGS OF THE SEMINAR ON ENVIRONMENTALLY SOUND FOREST ROADS AND WOOD TRANSPOR.** Sinaia, Romania.17-22 June 1996 FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS Rome, 1998. (*Spinell y Marchi, 1996*).
28. **RICE, R.M. AND P.A. DATZMAN.** 1981: Erosion associated with cable and tractor logging in north-western California. Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands. I.A.H.S. Pub1. No. 132 (Christchurch, 1981).
29. **RICE, R.M. AND P.A. DATZMAN.** 1981: Erosion associated with cable and tractor logging in north-western California. Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands. I.A.H.S. Pub1. No. 132 (Christchurch, 1981).
30. **RODE, M.; LINDENSCHMIDT, K.** 2001. Distributed sediment and Phosporus transport modeling on a medium sized catchment in Central Germany. *Phys. Chem. Earth (B)* 26 (7-8), 635-640.
31. **SCHULLA, J.; JASPER, K.** 2000. Model Description WaSiM-ETH, Institute of Geography, ETH Zürich. 166p.
32. **VERBUNT, M.; GURTZ, J.; JASPER, K.; LANG, H.; WARMERDAM, P.; ZAPPA, M.** 2003. The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *Journal of Hydrology* 282, 36-55.
33. **WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D.** (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses – a Guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537. Washington, D.C., United States of America.

ANEXO 1: Erosión observada y estimada, parámetros del modelo USLE y precipitación para diferentes prácticas de manejo en seis localidades, entre la IV y IX Región de Chile (HONORATO *et al.*, 2001.)

Práctica de Manejo	Región	Año	Precipitación*	Parámetros del modelo USLE					Erosión (t. ha ⁻¹ año)	
				R	K	LS	C	P	Estimada	Observada
Labranza Tradicional	IV	1993	138	40,0	0,42	0,27	0,50	1	2,22	0,77
Pradera Natural	IV	1993	138	40,0	0,42	0,27	0,35	1	1,55	0,23
Labranza Tradicional	IV	1994	70	28,2	0,42	0,27	0,50	1	1,56	0,81
Pradera Natural	IV	1994	70	28,2	0,42	0,27	0,35	1	1,09	0,28
Labranza Tradicional	IV	1995	106	27,6	0,42	0,27	0,05	1	1,53	0,87
Pradera Natural	IV	1995	106	27,6	0,42	0,27	0,35	1	1,07	0,40
Cero Labranza	VI	1993	555	88,5	0,32	0,21	0,07	1	0,41	1,17
Labranza Tradicional	VI	1993	555	88,5	0,32	0,21	0,50	1	2,91	3,21
Mínima Labranza	VI	1993	555	88,5	0,32	0,21	0,10	1	0,58	2,04
Pradera Natural	VI	1993	555	88,5	0,32	0,21	0,25	1	1,45	1,55
Suelo Destruído	VI	1993	555	88,5	0,32	0,21	1,00	1	5,81	4,41
Cero Labranza	VI	1994	452	165,1	0,32	0,21	0,07	1	0,76	1,94
Labranza Tradicional	VI	1994	452	165,1	0,32	0,21	0,50	1	5,42	4,63
Mínima Labranza	VI	1994	452	165,1	0,32	0,21	0,10	1	1,08	2,52
Pradera Natural	VI	1994	452	165,1	0,32	0,21	0,50	1	5,42	7,26
Suelo Destruído	VI	1994	452	165,1	0,32	0,21	1,00	1	10,85	24,69
Cero Labranza	VII	1993	753	147,8	0,23	0,21	0,07	1	0,49	1,30
Labranza Tradicional	VII	1993	753	147,8	0,23	0,21	0,50	1	3,52	8,80
Mínima Labranza	VII	1993	753	147,8	0,23	0,21	0,10	1	0,70	4,90
Cero Labranza	VIII	1994	844	157,6	0,22	1,00	0,07	1	2,45	0,29
Pradera Natural	VIII	1994	844	157,6	0,22	1,00	0,01	1	0,35	0,23
Suelo Destruído	VIII	1994	844	157,6	0,22	1,00	1,00	1	35,04	31,38
Cero Labranza	VIII	1995	952	181,7	0,22	1,00	0,07	1	2,83	0,10
Pradera Natural	VIII	1995	952	181,7	0,22	1,00	0,01	1	0,40	0,15
Suelo Destruído	VIII	1995	952	181,7	0,22	1,00	1,00	1	40,40	28,07
Cero Labranza	VIII	1996	906	85,6	0,22	1,00	0,07	1	1,33	0,06
Pradera Natural	VIII	1996	906	85,6	0,22	1,00	0,01	1	0,19	0,06
Cero Labranza	VIII	1997	1565	212,8	0,22	1,00	0,07	1	3,31	0,06
Pradera Natural	VIII	1997	1565	212,8	0,22	1,00	0,01	1	0,47	0,06
Suelo Destruído	VIII	1997	1565	212,8	0,22	1,00	1,00	1	47,32	34,35
Suelo Destruído	VIII	1978	1857	334,5	0,39	0,20	1,00	1	25,59	32,26
Suelo Destruído	VIII	1979	1638	219,7	0,39	0,20	1,00	1	16,80	22,44
Suelo Destruído	VIII	1980	1943	270,9	0,39	0,20	1,00	1	20,72	34,91
Suelo Destruído	VIII	1981	1707	280,3	0,39	0,20	1,00	1	21,44	34,28
Cero Labranza	IX	1996	664	85,8	0,32	0,24	0,07	1	0,46	0,72
Labranza Tradicional	IX	1996	664	85,8	0,32	0,24	0,50	1	3,32	4,98
Mínima Labranza	IX	1996	664	85,8	0,32	0,24	0,10	1	0,66	2,74
Pradera Natural	IX	1996	664	85,8	0,32	0,24	0,06	1	0,40	0,48
Cero Labranza	IX	1997	1188	170,7	0,32	0,24	0,07	1	0,92	1,14
Labranza Tradicional	IX	1997	1188	170,7	0,32	0,24	0,50	1	6,60	6,64
Mínima Labranza	IX	1997	1188	170,7	0,32	0,24	0,10	1	1,32	3,97
Pradera Natural	IX	1997	1188	170,7	0,32	0,24	0,06	1	0,79	0,63

* Fuente: Dirección General de Aguas y Dirección Meteorológica de Chile.