

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Alvaro Suazo Schwencke

Profesor Comisión: Verónica Lazcano Castro.

Ricardo Riveros Velásquez



**EROSIÓN EN TALUDES DE
PENDIENTE MEDIA TRATADOS
CON CONGONA Y BIOSÓLIDOS
APLICADOS EN MEZCLA CON EL
SUELO.**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para optar al título de Ingeniero Civil

LUIS PATRICIO HERNÁNDEZ ROJAS

CONCEPCIÓN, MARZO 2013

NOMENCLATURA

LAGEMA Laboratorio de Geotecnia y Medioambiente, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad del Bío –Bío.

USCS Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

DMCS Densidad Máxima Compactada Seca.

NCH Norma Chilena.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	3
1.1.- Objetivos.....	5
1.1.1 Objetivo General.....	5
1.1.2 Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA	6
2.1.- Caracterización del Suelo.	6
2.2.- Biosólidos.	7
2.3.- Aeonium Spathulatum (Congona).	8
2.4.- Lisímetros.	9
2.5.- Sistema de Lluvia Artificial.....	10
2.6.- Procedimiento de Ensayo.	11
2.7.- Descripción de Variables.....	13
2.7.1 <i>Infiltración.</i>	14
2.7.2 <i>Densidad.</i>	14
2.7.3 <i>Material Erodado Canal.</i>	14
2.7.3 <i>Material Erodado en Bidón.</i>	14
2.7.4 <i>Sólidos Volátiles y Minerales.</i>	14
2.7.5 <i>Diferenciación del Biosólido – Suelo.</i>	15
2.8.- Análisis Comparativo entre Recubrimientos.....	16
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS	17
3.1.- Densidades.....	17
3.2.- Material Erodado Canal.....	18
3.3.- Material Erodado Bidón.	18
3.4.- Diferenciación del Biosólido - Suelo.....	19

	iv
3.5.- Material Total Erodado.	20
3.6.- Análisis Estadístico.	21
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	24
BIBLIOGRAFÍA	26
ANEXO A: ANTECEDENTES GENERALES	30
ANEXO B: DISEÑO DE LISIMETROS	32
ANEXO C: SISTEMA DE LLUVIA ARTIFICIAL	34
ANEXO D: CONTROL DE DENSIDADES	35
ANEXO E: MATERIAL ERODADO	37
ANEXO F: SOLIDOS VOLÁTILES Y MINERALES.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas, Hualpén. ...	7
Figura 2: Aeonium Spathulatum (Congona)	8
Figura 3: Vista lateral proyectada, lisímetro de 60% de pendiente.	9
Figura 4: Simulador de lluvia artificial.	11
Figura 5: Lisímetros con diferentes recubrimientos.	12
Figura 6: Erosión Total Registrada.	20

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Promedio densidades.	17
Tabla 2: Material Erodado Canal.	18
Tabla 3: Material Erodado Bidón.	19
Tabla 4: Diferenciación Biosólido - Suelo.	20
Tabla 5: Comparación primera y segunda experiencia.	22
Tabla 6: Comparación talud patrón v/s diferentes recubrimientos.	22
Tabla 7: Comparación talud con congona v/s talud con biosólidos.	23
Tabla 8: Comparación recubrimientos día 15 v/s día 25.	23

EROSIÓN EN TALUDES DE PENDIENTE MEDIA TRATADOS CON CONGONA Y BIOSÓLIDOS APLICADOS EN MEZCLA CON EL SUELO.

LUIS PATRICIO HERNÁNDEZ ROJAS

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

luhernan@alumnos.ubiobio.cl

ÁLVARO SUAZO SCHWENCKE.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

asuazo@ubiobio.cl

RESUMEN

En el presente estudio se dan a conocer las ventajas de utilizar biosólidos y congona (*Aeonium Spathulatum*) como recubrimientos para disminuir la erosión hídrica en taludes de pendiente media. Para esto se dispone de cuatro lisímetros, que representan taludes a escala con una pendiente aproximada de 60 %, de los cuales uno de ellos no presenta ningún tipo de recubrimiento, otro con una mezcla de suelo biosólidos, el siguiente con plantación de congona y finalmente uno con mezcla de suelo biosólidos y congona. Éstos son sometidos a una lluvia erosiva, generada mediante un sistema de lluvia artificial, la cual genera arrastre de material el cual es cuantificado y analizado estadísticamente. Además se realizan pruebas comparativas entre los recubrimientos mediante análisis estadístico no paramétrico.

Los resultados del estudio presentan una satisfactoria y estadísticamente significativa mejora en la mitigación del efecto erosivo, donde el recubrimiento más efectivo fue aquél compuesto por suelo en mezcla con biosólidos y congona.

Palabras Claves: Erosión Hídrica, Recubrimiento, Lisímetro, *Aeonium Spathulatum*, Biosólidos, Material Erodado.

Numero de Palabras: $5.498 + 14 \cdot 250 = 8.998$ palabras.

EROSION IN AVERAGE GRADIENT SLOPES PROCESSED WITH AEONIUM SPATHULATUM AND BIOSOLIDS APPLIED TOGETHER IN THE SOIL.

LUIS PATRICIO HERNÁNDEZ ROJAS

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

luhernan@alumnos.ubiobio.cl

ÁLVARO SUAZO SCHWENCKE.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

asuazo@ubiobio.cl

ABSTRACT

The following study discloses the advantages of using biosolids and Aeonium Spathulatum as coatings so as to decrease rainfall erosion in average gradient slopes. In order to make this possible, four lysimeters are required representing slopes on scale with an approximate gradient of 60%, where the first of them does not present any type of coating, the second one have a biosolid soil mix, the next one have Aeonium Spathulatum plantation and finally the last one presents biosolid soil mix and Aeonium Spathulatum as well. These are subjected to an erosive rain generated by an artificial rain system, which generates the drag of material, being statistically quantified and analyzed. Also, comparative tests are performed between the coatings by nonparametric statistical analysis.

The results of this study show a satisfactory and significant improvement in mitigating the erosive effect, where the most effective coating was the one compound by biosolids soil mix and Aeonium Spathulatum.

Keywords: Rainfall erosion, Coating, Lysimeter, Aeonium Spathulatum, Biosolids, eroded material.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La erosión se define como el proceso de degradación, transporte y deposición de materiales del suelo por efecto de agentes erosivos, tales como el agua, el viento o el hielo (Peralta, 1993). Esta se puede observar claramente en los taludes que presenta la Región de Biobío, los cuales se ven afectados por las grandes precipitaciones que presenta esta región y la poca protección de los taludes una vez construidos.

Uno de los principales efectos de la erosión es que es irreversible y de gran magnitud. En casos extremos se puede producir la pérdida total del suelo en los taludes. La geomorfología y el régimen pluviométrico de Chile sitúan a la erosión hídrica como la primera causa de degradación de los suelos (Carrasco y Riquelme, 2003). Se debe considerar además la alta influencia en la erosión de taludes desprotegidos que generan las altas pendientes y la precipitación de carácter erosivo (Hernández, 2011), ya que el grado de la pendiente regula la velocidad de circulación del agua sobre la superficie de forma casi exclusiva (Suárez, 1980). A su vez está asociada a importantes alteraciones físicas, químicas y biológicas de las propiedades del suelo, que se expresan en reducciones de volumen, capacidad de campo, estabilidad mecánica y presencia de vegetación y fauna (Castillo, 2009).

Planteada esta problemática es que existen métodos para contrarrestar dicho efecto, como lo son el revestimiento con shotcrete o la incorporación de hidrosiembra. En el caso típico de la hidrosiembra es la falta de homogeneidad en el crecimiento del trébol enano, vetiver (*Vetiveria Zizanioides*), Falaris (*Phalarisarundinacea*) o los efectos de las sequías los que retardan el desarrollo de estos. Otro aspecto a considerar y no menospreciable es el factor económico, como lo es el caso del shotcrete (Rivas, 2011).

El manto vegetal influye sobre la proporción del escurrimiento del agua de lluvia y del arrastre del suelo más que cualquier otro factor físico por separado (Bennett, 1965). Estos otorgan protección a suelos desnudos, ya que aumentan el ligamento físico del suelo con tallos y raíces, incrementan la fauna y la actividad biológica que promueve una mejor

estructura al suelo, disminuyen el escurrimiento por la acción de los tallos, cañas y hojas (Lal, 1988). Una de las especies más utilizadas en el revestimiento de taludes, mediante hidrosiembra, es el trébol enano (*Trifolium repens huia*), el cual tiene una gran facilidad para desarrollarse y cubre rápidamente la superficie del talud. Es recomendable utilizarlo en periodos de otoño o invierno, dado que requiere suelos húmedos para su óptimo desarrollo.

La congona (*Aeonium Spathulatum*) es otra especie que se está utilizando para estos efectos, la cual presenta una gran resistencia a periodos de sequedad, la cual forma una especie de cojinete el cual ayuda a disminuir los efectos de la erosión por salpicadura, ya que la gota de agua no impacta directamente en el suelo. Esta a su vez presenta suculentos tallos que ayudan a reducir la erosión por escorrentías superficiales.

Otra alternativa son los biosólidos, los cuales se han investigado en el mundo por más de 30 años. Hace más de una década tienen en los países desarrollados un marco normativo que regula su aprovechamiento en actividades agrícolas y no agrícolas (recuperación de suelos, cobertura de rellenos sanitarios, aprovechamiento forestal), así como su disposición. Estos aportan un sustrato que facilita el desarrollo de especies vegetales. Esto se puede aprovechar para recuperar suelos con erosión hídrica, debido al incremento en el follaje y cantidad de raíces. Además proporciona una serie de nutrientes como nitrógeno y fósforo, esenciales para el desarrollo de la vegetación (López, 2012).

Con el propósito de optimizar y obtener mejores resultados en la disminución de los efectos de la erosión hídrica, se han realizado variados estudios mezclando biosólidos y manto vegetal, los cuales han arrojado excelentes resultados.

De acá nace el presente proyecto de título el cual se avoca específicamente a analizar la cantidad de material erosionado registrado por un talud a escala de pendiente media tratado con biosólidos en mezcla con el suelo y esquejes de congona, para así analizar y cuantificar su efectividad en términos comparativos respecto a otros con recubrimiento similar y desnudos.

1.1.- Objetivos.

1.1.1 Objetivo General.

- Estudiar los efectos de la aplicación de biosólidos en mezcla con el suelo junto con esquejes de congona en la erosión registrada en un talud a escala

1.1.2 Objetivos Específicos.

- Cuantificar la erosión en taludes a escala de pendiente media tratados con mezcla de biosólidos con suelo y esquejes de congona (*Aeonium Spathulatum*).
- Cuantificar la erosión en taludes a escala de pendiente media tratados con mezcla de biosólidos con suelo (sin vegetación).
- Comparar la erosión en taludes a escala de pendiente media tratados con biosólidos en mezcla con suelo y congona respecto a otros revestimientos (suelo desnudo, suelo-biosólidos y suelo-congona).

CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

En el presente capítulo se dará a conocer cada una de las etapas de experimentación, las cuales fueron realizadas en la Universidad del Bío-Bío, con sede en la Ciudad de Concepción, región del Biobío. Para este estudio fue necesario utilizar el diseño de lisímetros propuesto por Riquelme (2010). Para simular las precipitaciones fue necesario recurrir al sistema de lluvia diseñado por Hernández (2011).

2.1.- Caracterización del Suelo.

El suelo utilizado para el desarrollo de esta experiencia fue extraído del Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente (LAGEMA) de la Universidad del Bío-Bío, campus Concepción. Este corresponde a un suelo del tipo arena-limosa (SM), característico de esta región, que es posible encontrarlo en pendientes medias y/o altas. Este suelo fue utilizado en experiencias anteriores (como Rivas, 2011 y Meneses, 2011) y sus propiedades fueron corroboradas por (López, 2012) por lo que se utiliza los mismos valores obtenidos por este último.

Los resultados son los siguientes:

- Clasificación U.S.C.S : Arena Limosa (SM)
- Densidad natural húmeda: 1583 kg/m³.
- Densidad compactada seca: 1254 kg/m³.
- Humedad natural: 26%.
- Límite líquido: 36%.
- Límite plástico: N.P.
- Índice de plasticidad: N.P..
- Densidad Máxima Compactada Seca (D.M.C.S): 1759 kg/m³.

- Humedad óptima: 14%.

2.2.- Biosólidos.

Son originados después de un proceso de estabilización de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de las aguas residuales, el cual consiste en un proceso de digestión anaeróbica y luego secado en filtros de bandas. La estabilización se realiza para reducir su nivel de patogenicidad, su poder de fermentación y su capacidad de atracción de vectores. Gracias a este proceso, y luego de permanecer aproximadamente un mes en las canchas de acopio para su presecado, el biosólido tiene aptitud para utilización agrícola y forestal, y para la recuperación de suelos degradados.

Los biosólidos utilizados para este estudio (Figura 1), fueron tomados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Hualpén, Región del Biobío.



Figura 1: Lodos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas, Hualpén.

Fuente: Rivas (2011)

2.3.- *Aeonium Spathulatum* (Congona).

Planta arbustiva de tallos carnosos y gruesos (figura 2). Pertenece a las plantas suculentas cuyos tallos y hojas retiene abundantes jugos. Es resistente a las condiciones de sequedad. Puede alcanzar alturas de hasta 1,5 metros, formando una especie de cojinetes de color verde intenso. Aunque no es rastrera se reproduce por estolones, de manera tal que incluso los tallos que se desprenden y caen al suelo son capaces de enraizar y formar nuevas plantas. Su floración consta de unas pequeñas florcillas de color amarillo intenso. Se utiliza en áreas verdes como barrera de separación puesto que su denso follaje permite la realización de cercos vivos. Se utiliza también en medianas y taludes de pasto sobre nivel.

No es exigente al tipo de suelo ni a la exposición solar, su sistema radicular penetra incluso entre las grietas de rocas. Se puede implantar a raíz descubierta logrando un rápido establecimiento, pero su crecimiento es más lento que las especies rastreras (Riveros, 2003).



Figura 2: *Aeonium Spathulatum* (Congona)

Fuente: <http://es.zoomr.com/photos/eljardindelasdelicias/9122378/>

2.4.- Lisímetros.

El lisímetro es el objeto de estudio de las fases del ciclo hidrológico, que permite analizar y evaluar las mejores técnicas que ayudan a controlar la erosión hídrica que pueda ocurrir en los taludes (Riquelme, 2010).

Para este estudio se utilizaron cuatro lisímetros, regidos por el diseño de Riquelme (2010), los cuales poseen un área aproximada de 1 m^2 y una pendiente de 60%, representado en la figura 3. Estos fueron construidos por Cabrer (2011), quien realizó algunas mejoras con el fin de obtener una mejor representación de la realidad evitando las deflexiones producidas por el empuje que ejerce el suelo compactado con las paredes y la sobrepresión que genera al momento que el agua penetra en los poros del suelo alcanzando su saturación (Rivas, 2011).

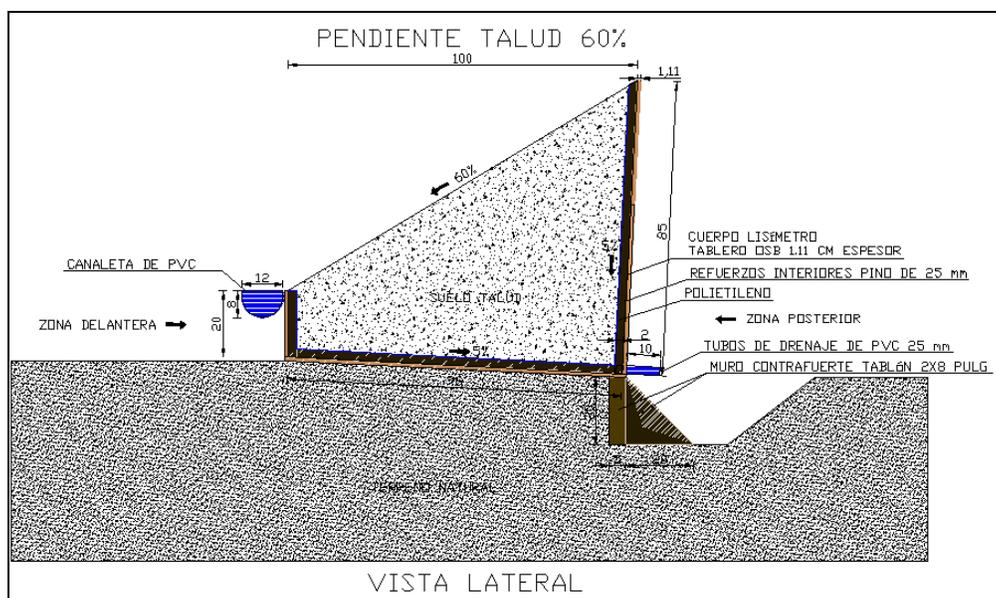


Figura 3: Vista lateral proyectada, lisímetro de 60% de pendiente.

Fuente: Riquelme (2010).

Dado que estos lisímetros se habían utilizado para estudios anteriores, fue necesario su reacondicionamiento, por el cual fueron removidos alrededor de 3 cm superficiales a cada uno de ellos en toda su área y la verificación de la pendiente que alcanza valores entre los 55 y 60 %.

A continuación se describe cada uno de los estratos con los cuales quedó finalmente constituido cada lisímetro:

a) *Estrato I (Inferior)*

Consiste en 23 kilos de arena, los cuales funcionan como filtro para evitar que las partículas finas de suelo evacuen y además facilitar el drenaje del agua infiltrada.

b) *Estrato II (Medio)*

Arena limosa (SM), la cual se somete a compactación de forma manual, por medio de un pisón de 24 kg sobre capas de aproximadamente 15 cm de espesor, con el fin de obtener rangos entre un 65% y 70% de la DMCS lo cual se asemeja de mejor forma a un talud real.

c) *Estrato III (Superficial)*

Conciene al estrato superficial de cada lisímetro, el cual hará la diferencia entre ellos incorporando diferentes mezclas de recubrimientos de biosólidos, suelo y congona.

2.5.- Sistema de Lluvia Artificial.

Para poder simular una lluvia de carácter erosivo, debido a la época de verano en que fue realizada la experiencia, fue necesario recurrir al sistema de lluvia artificial diseñado por Hernández (2011).

Las principales características de este sistema (Figura 4) son las siguientes:

- La presión de trabajo utilizada es de 0,5 bar.
- Manguera de ½", con perforaciones cada 5 cm.
- Diámetro de perforación de 0,5 mm, hecho con la punta de una aguja.
- Manómetro
- Altura de la estructura de 3,2 m.
- Tiempo de precipitación de 5 minutos.



Figura 4: Simulador de lluvia artificial.

Fuente: Hernández (2011).

Para determinar la cantidad total de agua precipitada, fue necesario obtener el caudal de trabajo a una presión de 0,5 bar. Para esto se instaló el manómetro a una altura de 0,60 metros y luego mediante un pluviómetro se verificó un caudal de 4,90 L/min ó 295 mm/hr. Por lo tanto el volumen total de agua precipitada, durante los 5 minutos de ensayo es de 24,5 L.

2.6.- Procedimiento de Ensayo.

Los ensayos consisten en medir la erosión hídrica de cuatro lisímetros de pendiente media. Para esto se considera remover los primeros tres centímetros de cada lisímetro para así aplicar a cada uno distintos tipos de recubrimiento:

- Suelo Descubierto.
- Suelo plantado con esquejes de congona.
- Suelo en mezcla con biosólidos.
- Suelo en mezcla con biosólidos junto con esquejes de congona.

La tasa de aplicación de biosólidos será de 30 Ton/Há. Ella se establece de estudios anteriores, ya que tasas sobre este valor no significan un mejor desarrollo vegetal y a su vez incrementa el agua almacenada en el suelo, reduce el agua infiltrada y disminuye levemente la evapotranspiración. (Suazo, A. y Maldonado, L. 2009).

Se utilizan 36 plantas de congona, las cuales tendrán una distribución al tresbolillo.

En la figura 5 se aprecia los lisímetros con los distintos tipos de recubrimientos.



Figura 5: Lisímetros con diferentes recubrimientos.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez aplicados los distintos tipos de recubrimientos, se realizan los siguientes pasos:

- Medir la densidad a través del método no invasivo propuesto por Hernández (2011), el cual consta de probetas tubulares de PVC de 2,2 cm de diámetro (volumen conocido), que son introducidas en el suelo mediante un doble giro de 360° hasta alcanzar una profundidad de 2,5 cm.
- Se enraza la superficie del testigo al nivel de la probeta y se rellenan las perforaciones con material nuevo mediante compactación manual.
- Se lleva los testigos al laboratorio de mecánica de suelos donde serán vaciados en recipientes previamente pesados e identificados. Se mide y registra el peso del recipiente más la muestra húmeda para posteriormente ser secado en horno hasta alcanzar masa constante.
- En el lugar del ensayo, se monta el sistema recolector de escorrentía (canal con manguera más depósito de mezcla sólido-líquido).
- Realizar el montaje del simulador de lluvia. Una vez instalado en la posición adecuada proceder a conectar la manguera de alimentación y abrir la llave de paso,

verificar la presión en el sistema y simultáneamente cuando cae la primera gota sobre la superficie comenzar a registrar el tiempo.

- Una vez transcurrido el tiempo del caso ensayado, cerrar la llave de paso. Trascurrido un par de minutos y cuando el material sólido de mayor tamaño presente haya visiblemente decantado, retirar cuidadosamente el canal receptor de sedimentos.
- Extraer el recipiente con mezcla sólido-líquido para ser colocado en una base horizontal hasta que logre el reposo, en ese instante registrar el volumen de precipitación escurrido sobre la superficie del talud.
- Extraer un testigo homogéneo de la mezcla no inferior a 250 cm³.
- Retirar el material contenido en la canaleta y colocarlo en un envase de transporte para ser llevado a laboratorio en donde será depositado en un recipiente previamente pesado e identificado el cual será secado en horno hasta lograr una masa constante.
- Extraer una submuestra homogénea de la mezcla sólido-líquido de 100ml aproximadamente y depositarlo en un recipiente previamente pesado e identificado el cual será secado en horno hasta alcanzar una masa constante.

Las lluvias erosivas se realizaron a los 15, 20 y 25 días después de plantados los esquejes de congona. Luego de esto, se realizó una repetición de estas lluvias con el fin de corroborar los datos obtenidos en la primera experiencia, para lo cual fue necesario reacondicionar los lisímetros y volver a repetir los pasos antes descritos.

2.7.- Descripción de Variables.

Las variables que influyen en la erosión, como lo es la escorrentía superficial, material erodado y flujo infiltrado, fueron medidos in-situ luego de precipitar.

A continuación se muestran las variables y frecuencias con que fue medida cada una de éstas:

2.7.1 Infiltración.

Debido a que la experiencia fue realizada en verano y con lluvia artificial, se considera que el agua precipitada no alcanza a infiltrarse, por lo que se asume nula.

2.7.2 Densidad.

Un parámetro importante y difícil de medir con exactitud es la densidad. Para asegurar que la densidad del talud fuese 70% +/- 10% de la D.M.C.S. (aprox. 1231,3 Kg/m³) fue necesario llevar un control de esta variable mediante el método no invasivo propuesto por Hernández (2011).

2.7.3 Material Erodado Canal.

Permite diferenciar la efectividad de los distintos tipos de recubrimientos. Se recolecta el material erodado más grueso, que es vaciado en pailas y llevado a un horno hasta obtener una masa constante.

2.7.3 Material Erodado en Bidón.

Corresponde al material que no alcanza a decantar debido a la fineza de sus partículas, éste se encuentra mezclado con el agua y es almacenado en bidones previamente graduados de los cuales se extraen muestras homogénea que se depositan en pailas previamente taradas, para luego cuantificar el material sólido presente en la mezcla mediante secado al horno. Esto permite obtener la concentración de material sólido presente en la muestra (g de suelo/g de mezcla), luego mediante una razón simple es posible calcular la cantidad de material sólido total concentrada en cada bidón.

2.7.4 Sólidos Volátiles y Minerales.

Los sólidos volátiles y minerales que constituyen el material erodado, tanto el depositado en las canaletas como en los bidones, son medidos luego de introducir las muestras depositadas en crisoles a una mufla, a una temperatura de trabajo de 550 °C y tiempo de ensayo de 20 minutos según Decreto N°4, 2010, Ministerio Secretaria General de la Presidencia.

La ecuación que gobierna el cálculo de sólidos minerales y volátiles es la que se describe a continuación:

$$SM = \frac{m_{\text{cri+ms}} - m_{\text{cri+carb.}}}{m_{\text{cri+ms}} - m_{\text{cri}}} \cdot 100$$

$$SV = 100\% - SM$$

Dónde:

SM = Sólidos minerales, medido en %.

$m_{\text{cri+ms}}$ = masa crisol más masa seca, medida en g.

$m_{\text{cri+carb.}}$ = masa crisol más masa carbonizada, medida en g.

m_{cri} = masa crisol, medida en g

SV = Sólidos volátiles, medida en %.

2.7.5 Diferenciación del Biosólido – Suelo.

El criterio que se utiliza para determinar y cuantificar la cantidad de biosólido y suelo, va a depender de los valores arrojados en el ensayo de sólidos volátiles aplicado.

Si los sólidos volátiles se encuentran entre un 8,4 % y 49,7 % se está en presencia de una mezcla de material conformado por biosólido y suelo. Mientras que, si el material erodado después de ser sometido al procedimiento para determinar el porcentaje de sólidos volátiles sobrepasa el 49,7 %, entonces el material erodado se considera totalmente biosólido y si por el contrario los valores son menores al 8,4 %, se concluye que la muestra corresponde 100% a suelo.

Este criterio se basa en la máxima y mínima cantidad de materia orgánica que debiera tener el biosólido y suelo puro respectivamente.

2.8.- Análisis Comparativo entre Recubrimientos.

A la hora de analizar los datos recogidos, la elección de un método de análisis adecuado es crucial para evitar llegar a conclusiones erróneas. Para ello se realizó la prueba de comparación de Wilcoxon, test que proviene de la estadística no paramétrica, que permite afirmar si la cantidad de suelo erodado de un talud patrón posee diferencias estadísticamente significativas con respecto a los otros tipos de recubrimientos.

Para esto se plantea una hipótesis nula (H_0) y una hipótesis alternativa (H_1), donde:

- H_0 : No existen diferencias significativas entre las muestras.
- H_1 : Existen diferencias significativas entre las muestras.

El nivel de significancia representa la probabilidad de rechazar una hipótesis nula verdadera, matemáticamente se puede considerar cualquier valor entre cero y uno; pero para estudios de pruebas de hipótesis normalmente está entre 0,05 y 0,1.

Para todos los análisis y obtención de las tablas de comparación, se utilizó el software estadístico Infostat en su versión estudiantil, con un nivel de significancia (p-valor) $< 0,05$.

El criterio a utilizar es el siguiente:

- Si (p-valor) es igual o menor que 0,05, se acepta H_1 y se rechaza H_0 .
- Si (p-valor) es mayor que 0,05, se acepta H_0 y se rechaza H_1 .

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos después de cada ensayo realizado a cada uno de los lisímetros con sus respectivos recubrimientos. Las variables de interés principalmente son el material erodado en el canal como en el bidón, donde los valores obtenidos serán analizados y comparados para así poder dar solución a los objetivos propuestos al inicio de este estudio.

3.1.- Densidades.

La densidad del suelo fue medida con el fin de representar de mejor manera las condiciones presentes en un talud real. Esto se logró con la toma de muestras en tres partes diferentes del recubrimiento aplicado (anexo A), obteniendo densidades promedio para cada lisímetro con su respectivo recubrimiento y cada una de las experiencias (Ver tabla 1).

Tabla 1: Promedio densidades.

Recubrimiento	Densidad (Kg/m ³)	
	1° Experiencia	2° Experiencia
Suelo	1429	1327
Biosólidos	1381	1368
Congona	1396	1310
Congona/Biosólidos	1296	1274

Fuente: Elaboración Propia

Dadas estas densidades se asegura el cumplimiento del 70% +/- 10% de la D.M.C.S. (aprox. 1231 Kg/m³).

3.2.- Material Erodado Canal.

El material retenido en el canal de los pies del talud corresponde a partículas de mayor tamaño y peso, que son arrastradas por la escorrentía superficial durante cada precipitación. La cantidad de material erodado retenido en el canal se detalla en la tabla 2, donde se aprecia una diferencia notoria entre los lisímetros que cuentan con algún tipo de recubrimiento con respecto al suelo descubierto.

El recubrimiento que presentó menor cantidad de material erosionado fue el compuesto por mezcla de suelo, biosólidos y congona. Por el contrario, el que presentó mayor cantidad de material erodado es el suelo descubierto.

Cabe destacar que el recubrimiento con congona y el que presenta biosólidos, también logran mitigar el efecto de la erosión en una tasa muy parecida.

Además se observa que para un mismo recubrimiento no se generan grandes diferencias entre los valores obtenidos entre una experiencia y otra.

Tabla 2: Material Erodado Canal.

Recubrimiento	Suelo Erodado en Canal (gr)					
	Día 15		Día 20		Día 25	
	1°	2°	1°	2°	1°	2°
Suelo	1046	994	974	978	1015	988
Biosólidos	774	795	725	718	748	733
Congona	814	779	763	759	756	774
Congona/Biosólidos	693	659	650	643	678	658

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.- Material Erodado Bidón.

El material que se encuentra suspendido en el agua es desplazado a bidones debido a la fineza de sus partículas. De éstos se toma una muestra homogénea para ser analizada y cuantificada para así poder calcular el material total suspendido en el bidón. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Material Erodado Bidón.

Día	Recubrimiento	1° Experiencia		2° Experiencia	
		Volumen Ecurrido (gr)	Suelo en Suspensión (gr)	Volumen Ecurrido (gr)	Suelo en Suspensión (gr)
15	Suelo	9145	80,60	9657	53,27
15	Biosólidos	6287	34,46	6639	49,35
15	Congona	6549	26,45	6916	30,99
15	Congona/Biosólidos	4163	27,32	4396	30,16
20	Suelo	9426	53,07	9190	56,43
20	Biosólidos	6781	40,15	6611	39,18
20	Congona	6192	46,51	6037	41,47
20	Congona/Biosólidos	3985	23,10	3885	26,20
25	Suelo	10175	40,69	9768	52,71
25	Biosólidos	7032	54,38	6751	43,98
25	Congona	6882	21,60	6607	34,13
25	Congona/Biosólidos	4319	25,32	4146	27,92

Fuente: Elaboración Propia.

En la mayoría de los ensayos, el lisímetros que presenta una mayor cantidad de suelo en suspensión es aquel que no presenta ningún tipo de recubrimiento. Por el contrario el recubrimiento que menos material en suspensión presenta, es el bidón que recolecta los flujos del lisímetro recubierto por suelo, biosólidos y congona.

3.4.- Diferenciación del Biosólido - Suelo.

Luego de calcinar las muestras en la mufla y analizar con los parámetros de referencia obtenidos, se puede decir que el material erodado corresponde en un 100 % a suelo, ya que ninguna de las muestras logró superar el límite de porcentaje de sólidos volátiles (8,4 %), lo cual se observa en la tabla 4.

Tabla 4: Diferenciación Biosólido - Suelo.

Día	Muestra	% Sólidos Volátiles	
		1° experiencia	2° experiencia
15	Biosólidos	7,74	8,21
15	Congona/Biosólidos	8,05	5,63
20	Biosólidos	7,59	7,83
20	Congona/Biosólidos	7,35	8,18
25	Biosólidos	8,31	5,62
25	Congona/Biosólidos	6,17	6,54

Fuente: Elaboración Propia.

3.5.- Material Total Erodado.

El material total erodado corresponde a la suma del material erodado en el canal más el material suspendido en los bidones. Estos valores se obtienen mediante la aplicación del procedimiento descrito en el punto 2.6. Luego se realiza una segunda experiencia que consta de aplicar nuevamente los recubrimientos y repetir los ensayos realizados.

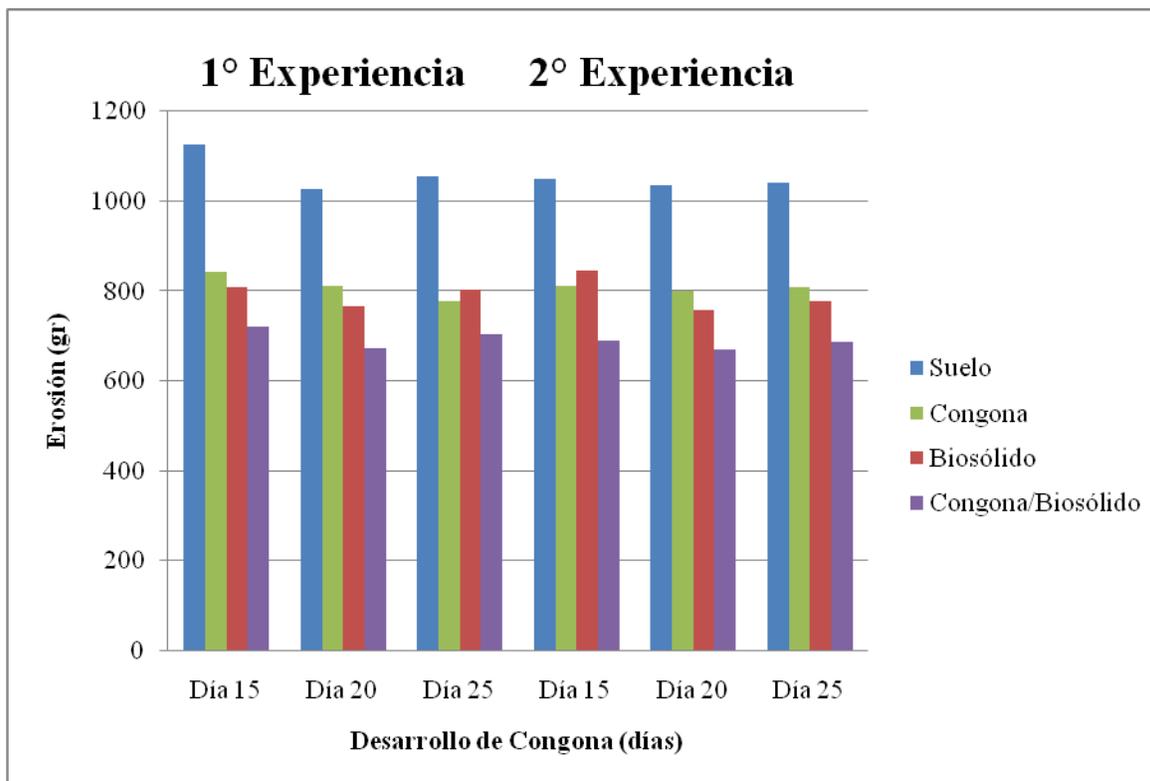


Figura 6: Erosión Total Registrada.

Fuente: Elaboración Propia.

El lisímetro que registra la mayor cantidad de material erodado es el que presenta suelo descubierto, el cual es utilizado como patrón de comparación para los demás recubrimientos.

La aplicación de biosólidos logra reducir en gran medida la erosión, al igual que la congona, logrando valores muy cercanos. Sin embargo, la aplicación de ambos favorece aun más la reducción de material erosionado, ya que la congona evita que las gotas impacten directamente con el suelo. Por tanto el recubrimiento que logró mitigar de mejor forma el efecto de la erosión, logrando un valor de 35%, fue el que presenta suelo, biosólidos y congona.

De igual manera el lisímetro compuesto por biosólidos reduce en un 25% aproximadamente el efecto de la erosión, superando al recubrimiento de congona que alcanza un valor promedio de 23%. La congona al momento de realizar las mediciones no evidencia un gran desarrollo, con lo cual se espera que pasado un tiempo esta condición se invierta, posicionando por encima del biosólido y a su vez aumentado aun más la efectividad del talud con los mezcla se suelo biosólidos y congona.

En la figura se aprecia qué en los ensayos del día 25 de la primera experiencia y el día 15 de la segunda, los valores que desarrolla el recubrimiento de congona con respecto a los biosólidos, escapan a la tendencia de los otros cuatro ensayos.

La mayor diferencia de material erosionado entre la 1° y 2° experiencia se produjo en el día 15 para el lisímetro con suelo desnudo, alcanzando un valor de 78,93 g, mientras que las demás van entre 6,65 a 36,06 g.

3.6.- Análisis Estadístico.

Se aplicó el método no paramétrico de Wilcoxon, para comparar los resultados obtenidos entre la primera y segunda experiencia, como también los distintos recubrimientos aplicados a cada talud entre sí.

En primera instancia se compararon los valores registrados entre cada experiencia, con el fin de determinar si se produjeron grandes diferencias al momento de realizar los ensayos.

Los resultados se presentan en la tabla 5.

Tabla 5: Comparación primera y segunda experiencia.

Obs (1)	Obs (2)	N	Var (R+)	Media (dif)	DE (dif)	p-valor
1° Exp	2° Exp	12	162.5	12.24	30.11	0.1884

Fuente: Elaboración Propia.

El p-valor encontrado es mayor que el nivel de significancia asumido ($p\text{-valor} > 0,05$) lo que según el criterio descrito en el punto 2.8, se asume la hipótesis nula (H_0) que indica que no existen diferencias significativas entre experiencias. Esto se debe a que se mantuvieron las mismas condiciones de los factores utilizados.

Luego se procedió a comparar el efecto de los recubrimientos, para lo cual se seleccionó al talud descubierto como patrón comparativo con los demás lisímetros. Los resultados se observan en la tabla 6.

Tabla 6: Comparación talud patrón v/s diferentes recubrimientos.

Obs (1)	Obs (2)	N	Var (R+)	Media (dif)	DE (dif)	p-valor
S	S-C	6	22.75	247.92	27.37	0.0032
S	S-B	6	22.75	262.90	37.16	0.0280
S	S-C-B	6	22.75	365.36	20.6	0.0001

Fuente: Elaboración Propia.

Si se analizan los p-valor de la tabla 6, se nota que los tres valores obtenidos son menores que el nivel de significancia impuesto, es decir, sus $p\text{-valor} < 0,05$ con lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, la que indica que el material erodado en los taludes con algún tipo de recubrimiento, ya sea suelo-congona, suelo-biosólido o suelo-biosólido-congona, presenta diferencias estadísticamente significativas con respecto al talud patrón de comparación. Con esto se puede afirmar que la aplicación de un recubrimiento a un suelo ayuda a disminuir los efectos provocados por la erosión hídrica. Cabe señalar, que el valor correspondiente al recubrimiento compuesto por suelo-biosólido-congona, es el más cercano a cero, por ende, el que representa la mayor diferencia con respecto al arrastre de suelo.

También es necesario comparar los lisímetros que presenta plantación de congona con el recubrimiento compuesto por biosólidos, para determinar si las cantidades de material erodado se diferencian mucho entre sí. Los resultados de comparación se presentan en la tabla 7.

Tabla 7: Comparación talud con congona v/s talud con biosólidos.

Obs (1)	Obs (2)	N	Var (R+)	Media (dif)	DE (dif)	p-valor
S-C	S-B	6	22.75	14.98	35.25	0.164

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados obtenidos muestran un p-valor superior al nivel de significancia 0,05. Con esto se puede afirmar que se cumple la hipótesis nula (H_0) que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los taludes comparados.

De igual forma se comparan los resultados obtenidos entre el día 15 y el día 25, para lo cual se consideró el promedio de los valores de cada experiencia.

Tabla 8: Comparación recubrimientos día 15 v/s día 25.

Obs (1)	Obs (2)	N	Var (R+)	Media (dif)	DE (dif)	p-valor
Día 15	Día 25	4	7.5	29.61	13.07	0.6356

Fuente: Elaboración Propia.

El p-valor indicado en la tabla 8 está sobre el valor de significancia, lo que revela que no se aprecian diferencias estadísticamente significativas de material total erodado entre el día 15 y el día 25, por lo que se acepta la hipótesis nula. Esto se asocia al lento desarrollo de los esquejes de congona.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los lisímetros que presentaron la menor cantidad de material erodado fueron aquéllos que exhiben algún tipo de recubrimiento, quedando en evidencia que su uso ayuda en gran medida a mitigar los efectos de la erosión hídrica.

El recubrimiento que presentó mayor eficiencia al momento de aplicar las lluvias erosivas, fue aquél compuesto por mezcla de suelo biosólidos y congona. Este presentó las menores cantidades de suelo erosionado, mostrando diferencias estadísticamente significativas con respecto a los demás recubrimiento, disminuyendo en aproximadamente un 35 % la erosión, posicionándose como el método más efectivo con respecto a los demás. De igual forma, el recubrimiento que presenta sólo congona redujo en aproximadamente un 23 % el efecto de la erosión, mientras que el lisímetro cubierto sólo por biosólidos redujo en aproximadamente 25 %. Es de esperar que los porcentajes de mitigación de erosión antes mencionados aumenten a medida que pase el tiempo, ya que al momento de realizar los ensayos la congona no había alcanzado su máximo desarrollo.

La utilización de esquejes de congona es una buena forma al momento de plantar, pues otorga una sobrevivencia del 100 % adaptándose de buena manera a periodos de escasas de lluvia. Esta a su vez ayuda a evitar que las gotas impacten directamente sobre el talud, pero no es recomendable como medida a corto plazo dado que en el periodo de estudio no manifestó un gran crecimiento visible.

La aplicación de biosólidos en mezcla con el suelo y esquejes de congona, es una manera práctica y económica al momento de querer implementar esto constructivamente, pero sólo para taludes de rellenos, donde los biosólidos pueden ser mezclados previos a su fabricación.

En relación al material erosionado, se puede decir que corresponde en un 100 % a suelo puro, no presentando arrastre de biosólidos.

Se comprobó que se lograron establecer condiciones similares durante la secuencia de ensayos, dado que no se produjeron diferencias estadísticamente significativas en las cantidades de material erosionado.

Planteadas las conclusiones anteriores, se recomienda la utilización de congona (*Aeonium Spathulatum*) y la incorporación de biosólidos aplicados en mezcla con el suelo para una medida efectiva de protección en taludes con una pendiente aproximada de 60%, esto respecto a la erosión hídrica producida por las intensas lluvias que caen en la región del Biobío.

BIBLIOGRAFÍA

- Bennett, H. 1965. Elementos de conservación del suelo. Fondo de la Cultura Económica. México, México. 427p.
- Cabrer, J. 2011. Efectos de la etapa de germinación de trébol enano en la erosión de un talud de alta pendiente. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Carrasco, J. y Riquelme, J. 2003. Métodos y prácticas de conservación de suelos y aguas. Instituto de investigaciones agropecuarias, INIA. Boletín N° 103. Rancagua, Chile. 132 p.
- Castillo, M. 2009. Influencia del método de incorporación de biosólidos sobre suelos en el desarrollo vegetal y en la evapotranspiración de la congona. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Decreto N°4, 2010, Ministerio Secretaria General de la Presidencia. “Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamientos de aguas servidas”
- Díaz, V. 2011. Estudio de la erosión hídrica en taludes plantados con congona durante el otoño. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Gutiérrez, L. 2012. Erosión en taludes de alta pendiente tratados con mezcla de biosólidos, suelo, y trébol enano. . Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.

- Hernández, D. 2011. Influencia de la pendiente y la precipitación en la erosión de taludes desprotegidos. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Jay L. Devore. 2008. “Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias” Séptima edición, Editorial Cengage Learning, México.
- Lal, R. (1988). Erodibility and erosivity. pp: 141-160. In: Lal, R. (Ed.) Soil erosion research methods. CRC Press. New York, EEUU. 244p.
- López, A. 2012. Análisis de la Erosión en Taludes de baja pendiente tratados con mezcla de Biosólidos, Suelo y Trébol enano. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Meneses, A. 2011. Estudio de la erosión hídrica en taludes sembrados con trébol enano durante el otoño. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Norma Chilena Nch 165 of 77. “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”
- Norma Chilena Nch 1517/ I. “Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 1: Determinación del límite líquido”
- Nch 1517/ II of 1979. “Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 2: Determinación del límite plástico”
- Riquelme, C. 2010. Diseño de lisímetros para estudiar la erosión hídrica en taludes a escala. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.

- Rivas, R. 2011. Efectos de la incorporación de biosólidos en la erosión de taludes desprotegidos. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Riveros, R. 2003. Implementación y optimización de sistema de recubrimiento económico, no tradicional, para taludes de la VIII región. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Suárez D.C., F. 1980. Conservación de Suelos. San Jose, Costa Rica: IICA.
- Suárez D. J. 2009. Efectos del agua en la Erosión. Costa Rica.
- Suazo, A. y Maldonado, L. 2009 "Influencia de la aplicación de biosólidos en el balance hídrico superficial". XIX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Valparaíso, Chile, Octubre 2009.

ANEXOS

ANEXO A: ANTECEDENTES GENERALES

En el presente anexo se darán a conocer los conceptos básicos para poder comprender el fenómeno de la erosión y la forma de mitigar esta misma en los taludes.

A.1.- Ciclo Hidrológico

También conocido como ciclo del agua, describe el movimiento continuo y cíclico del agua en el planeta tierra. El agua puede cambiar su estado entre líquido, vapor y hielo en varias etapas del ciclo, y los procesos pueden ocurrir en cuestión de segundos o en millones de años. Es un proceso continuo en el que una partícula de agua evaporada del océano vuelve al océano después de pasar por las etapas de precipitación, escorrentía superficial y/o escorrentía subterránea como se presenta en la figura 1.

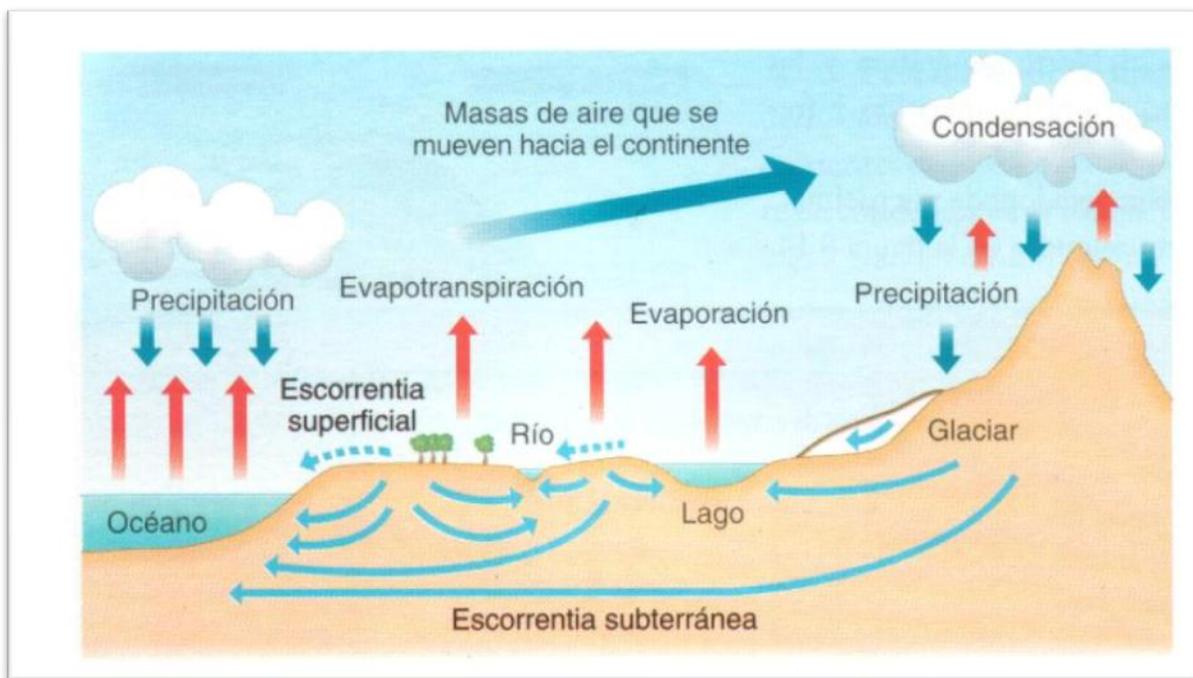


Figura 1: Ciclo Hidrológico.

Fuente: <http://sistemajpii.blogspot.com/2011/03/ciclo-hidrologico.html>

A.2.- Erosión

Corresponde a una serie de procesos de naturaleza física y química que desgastan y destruyen los suelos y rocas de la corteza terrestre. Algunos de los agentes causantes son el viento, el agua, la gravedad, la vegetación y la acción humana cuyos efectos se perciben en un periodo de tiempo mucho menor.

A.2.1.- Erosión Hídrica

Se define como la pérdida selectiva, recurrente y progresiva de la capa superficial del suelo por la acción del agua. La causa de esta es producto del impacto de las gotas de lluvias que al momento de precipitar adquieren gran energía potencia provocando desprendimiento de las partículas de suelo y su vez estas son arrastradas por la escorrentía superficial producto del exceso de lluvias, las cuales arrancan las partículas de la superficie del suelo y las transportan a otro lugar. Esta erosión se puede percibir de tres maneras, ya sea de forma laminar, en forma de surco o cárcavas.

A.3.- Talud

Corresponde a cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, ya sea de forma natural o como consecuencia de la intervención humana. Los taludes naturales son llamados laderas, mientras que los artificiales se conocen como cortes o terraplenes.

A.3.1.- Estabilidad del Talud

Se dice que un talud es estable cuando es capaz de autoportarse, es decir, cuando todas las fuerzas y momentos actuantes en él, son capaces de ser resistidos por la fuerza de resistencia al corte del suelo. Cuando los taludes son afectados producto de la erosión, estos comienzan a degradarse generando pérdidas de material, lo cual si no es controlado a tiempo puede provocar el volcamiento o deslizamiento de toda la masa del talud. Esto se visualiza en la parte alta del talud produciendo un hundimiento del terreno.

ANEXO B: DISEÑO DE LISIMETROS

B.1.- Estructura de los taludes a escala.

El diseño utilizado es el propuesto por Riquelme (2010). Sin embargo se le hicieron algunas mejoras para entregar mayor resistencia a las deflexiones en las uniones entre placas, producidas por el empuje que ejerce el suelo compactado con las paredes y la sobrepresión que se genera al momento que el agua penetra en los poros del suelo alcanzando su saturación.

Los materiales utilizados en la construcción de éstos, se describen a continuación:

- OSB Estructural para el cuerpo de los lisímetros, elementos que fueron unidos con refuerzos interiores.
- Pino dimensionado de 2x3” que sirve para reforzar las uniones de la madera OSB en el interior y exterior del lisímetro. Se utiliza pino dimensionado de 1x4” en todo el perímetro para reforzar la parte superior, tanto de las paredes laterales como de la cara posterior y frontal.
- Clavos corrientes de 2 ½” para refuerzos interiores y placas OSB, además de clavos corrientes de 4” y de 3 ½” para refuerzos exteriores.

B.2.- Elementos de funcionamiento

Son aquellos cuyo objetivo es permitir una mayor funcionalidad del lisímetro. Las características de dichos elementos se describen a continuación:

- Tubo de PVC Hidráulico de 1 pulgada de diámetro, insertados en la cara posterior y parte baja del lisímetro con el fin de evacuar las aguas de infiltración del suelo.
- Codos de PVC de 1 pulgada, que ayuda a la circulación del flujo infiltrado al recipiente de almacenamiento.

- Malla Raschel, ubicada en el extremo interior del tubo de PVC del lisímetro, que sirve como filtro en la salida de este y evita que las aguas evacuen demasiado sedimento.
- Canaleta de PVC, ubicado en cada lisímetro en la parte delantera donde se recoge el caudal de escorrentía superficial que se produce por la pendiente del talud.
- Ganchos de Canaleta, ubicados en los extremos de la parte delantera de cada lisímetro que ayudan a soportar las canaletas de PVC.
- Tapas de Canaleta, ubicados en los extremos de la canaleta para sellar la canaleta y contener el agua producida por el caudal de escorrentía y suelo degradado producto del arrastre.
- Conexión de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada, ubicada en el sistema de recolección de flujo superficial y que une una tapa de la canaleta, con una manguera de $\frac{3}{4}$ pulgada la cual se conecta al bidón plástico de 25 litros.
- Manguera de $\frac{3}{4}$ de pulgada, la cual es utilizada para conducir las aguas a los bidones receptores del flujo erodado.
- Pegamento de PVC, para unir todos los elementos de la canaleta, para evitar posibles fugas de agua.
- Bidones de 5 litros, ubicadas bajo los tubos de PVC, para poder medir y cuantificar el flujo de infiltración que se producirá en el suelo que contiene el lisímetro.
- Bidones Receptores, con una capacidad para almacenar de 25 litros ubicados en la zona de recolección de flujo superficial.

ANEXO C: SISTEMA DE LLUVIA ARTIFICIAL

C.1. Características Principales.

El diseño fue realizado por Hernández (2001) el cual consta de un bastidor de madera de 1,2m por 1,2m y en el cual se distribuyen uniformemente cuatro líneas de aspersión separadas cada 200 mm. Sobre estas últimas hay un circuito de manguera de 13 mm de diámetro, el cual está perforado cada 30 mm con un orificio de diámetro 0,5 mm (aguja a alta temperatura).

Este sistema es alimentado mediante una manguera conectada a una llave de paso, cuyo caudal está condicionado mediante la regulación de la presión, la cual es medida mediante un manómetro y regulada a 0,5 bar, mediante el giro de la llave de alimentación de agua. El sistema de lluvia artificial es ubicado sobre una torre de elevación de madera de 1,5 m x 1,2 m de área en planta y de 3,2 m de altura de caída del agua, en ésta se colocó una cubierta de polietileno transparente en tres caras de la torre para proteger la lluvia artificial del viento, para así asegurar que la lluvia cayera sobre los lisímetros. El sistema completo puede apreciarse en la figura 2.



Figura 2: Sistema completo de lluvia artificial.

Fuente: Hernández (2011)

ANEXO D: CONTROL DE DENSIDADES

En las siguientes tablas se detallan las densidades obtenidas para los cuatro recubrimientos y cada experiencia.

D.1.- Densidades primera experiencia.

Tabla D.1.1.- Suelo desnudo.

N° Tubo	Tara (g)	Tara + M seca (g)	M seca (Kg)	Altura (m)	Volumen (m3)	Densidad (Kg/m3)	
1	9.76	44.33	0.03457	0.021	2.4171E-05	1430.23	1429.08
2	9.54	46.68	0.03714	0.023	2.6473E-05	1402.94	
3	9.23	46.05	0.03682	0.022	2.5322E-05	1454.07	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla D.1.2.- Suelo – Biosólido.

N° Tubo	Tara (g)	Tara + M seca (g)	M seca (Kg)	Altura (m)	Volumen (m3)	Densidad (Kg/m3)	
4	9.87	46.76	0.03689	0.023	2.6473E-05	1393.50	1381.13
5	9.9	44.89	0.03499	0.023	2.6473E-05	1321.72	
6	9.32	43.84	0.03452	0.021	2.4171E-05	1428.16	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla D.1.3.- Suelo – Congona.

N° Tubo	Tara (g)	Tara + M seca (g)	M seca (Kg)	Altura (m)	Volumen (m3)	Densidad (Kg/m3)	
7	8.98	45.32	0.03634	0.022	2.5322E-05	1435.12	1396.56
8	9.39	43.95	0.03456	0.021	2.4171E-05	1429.81	
9	9.57	47.69	0.03812	0.025	2.8775E-05	1324.76	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla D.1.4.- Suelo – Congona - Biosólido.

N° Tubo	Tara (g)	Tara + M seca (g)	M seca (Kg)	Altura (m)	Volumen (m3)	Densidad (Kg/m3)	
10	9.44	48.45	0.03901	0.026	2.9926E-05	1303.55	1296.12
11	9.95	47.28	0.03733	0.025	2.8775E-05	1297.31	
12	9.21	47.74	0.03853	0.026	2.9926E-05	1287.51	

Fuente: Elaboración Propia

D.2.- Densidades segunda experiencia.

Tabla D.2.1.- Suelo desnudo.

N° Tubo	Tara (g)	Tara + M seca (g)	M seca (Kg)	Altura (m)	Volumen (m3)	Densidad (Kg/m3)	
1	9.76	47.46	0.0377	0.025	2.8775E-05	1310.17	1327.03
2	9.54	48.65	0.03911	0.026	2.9926E-05	1306.89	
3	9.23	45.34	0.03611	0.023	2.6473E-05	1364.03	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla D.2.2.- Suelo – Biosólido.

N° Tubo	Tara (g)	Tara + M seca (g)	M seca (Kg)	Altura (m)	Volumen (m3)	Densidad (Kg/m3)	
4	9.87	42.89	0.03302	0.021	2.4171E-05	1366.10	1368.34
5	9.9	45.67	0.03577	0.023	2.6473E-05	1351.19	
6	9.32	44.46	0.03514	0.022	2.5322E-05	1387.73	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla D.2.3.- Suelo – Congona.

N° Tubo	Tara (g)	Tara + M seca (g)	M seca (Kg)	Altura (m)	Volumen (m3)	Densidad (Kg/m3)	
7	8.98	46.56	0.03758	0.024	2.7624E-05	1360.41	1310.92
8	9.39	48.12	0.03873	0.026	2.9926E-05	1294.19	
9	9.57	47.82	0.03825	0.026	2.9926E-05	1278.15	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla D.2.4.- Suelo – Congona - Biosólido.

N° Tubo	Tara (g)	Tara + M seca (g)	M seca (Kg)	Altura (m)	Volumen (m3)	Densidad (Kg/m3)	
10	9.44	46.9	0.03746	0.025	2.8775E-05	1301.82	1274.43
11	9.95	47.78	0.03783	0.026	2.9926E-05	1264.12	
12	9.21	45.39	0.03618	0.025	2.8775E-05	1257.34	

Fuente: Elaboración Propia

ANEXO E: MATERIAL ERODADO

Para la realización de este estudio fue necesario cuantificar el material erodado en el canal como también el depositado en los bidones para poder obtener el material total erodado. Estos valores se detallan en las tablas que se muestran a continuación como también se presentan tablas que fueron necesarias realizarlas para poder obtener dichos valores.

E.1.- Suelo Erodado Canal.

Tabla E.1.1.- Detalle día 15, 1° exp.

Recubrimiento	Paila	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)
S	60	140.04	1459.53	1186.61	1046.57
S/Bs	32	138.27	1095.28	912.73	774.46
S/C	58	151.81	1181.10	966.53	814.72
S/C/Bs	RM-11	100.15	956.95	793.49	693.34

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.1.2.- Detalle día 20, 1° exp.

Recubrimiento	Paila	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)
S	60	140.04	1371.36	1114.93	974.89
S/Bs	32	138.27	1036.40	863.67	725.40
S/C	58	151.81	1118.94	915.66	763.85
S/C/Bs	RM-11	100.15	904.79	750.24	650.09

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.1.3.- Detalle día 25, 1° exp.

Recubrimiento	Paila	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)
S	60	140.04	1421.08	1155.35	1015.31
S/Bs	32	138.27	1064.33	886.94	748.67
S/C	58	151.81	1110.14	908.46	756.65
S/C/Bs	RM-11	100.15	938.57	778.25	678.10

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.1.4.- Detalle día 15, 2° exp.

Recubrimiento	Paila	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)
S	55	148.67	1406.66	1143.63	994.96
S/Bs	CE-6	101.49	1076.54	897.12	795.63
S/C	RM-12	99.34	1073.47	878.45	779.11
S/C/Bs	46	131.23	953.90	790.96	659.73

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.1.5.- Detalle día 20, 2° exp.

Recubrimiento	Paila	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)
S	55	148.67	1386.03	1126.85	978.18
S/Bs	CE-6	101.49	984.56	820.47	718.98
S/C	RM-12	99.34	1047.55	857.24	757.90
S/C/Bs	46	131.23	934.58	774.94	643.71

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.1.5.- Detalle día 25, 2° exp.

Recubrimiento	Paila	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)
S	55	148.67	1398.98	1137.38	988.71
S/Bs	CE-6	101.49	1001.78	834.82	733.33
S/C	RM-12	99.34	1067.82	873.83	774.49
S/C/Bs	46	131.23	952.14	789.50	658.27

Fuente: Elaboración Propia

E.2.- Material Erodado Bidón.

Tabla E.2.1.- Detalle de Concentración día 15, 1° exp.

Paila	Recubrimiento	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)	Concentración (gr/gr)
3	S	141.15	329.05	142.81	1.66	0.0088
25	S/Bs	97.30	222.10	97.98	0.68	0.0055
75	S/C	150.60	290.27	151.16	0.56	0.0040
16	S/C/Bs	140.20	239.85	140.85	0.65	0.0066

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.2.2.- Detalle de Concentración día 20, 1° exp.

Paila	Recubrimiento	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)	Concentración (gr/gr)
3	S	141.15	342.58	142.28	1.13	0.0056
25	S/Bs	97.30	195.60	97.88	0.58	0.0059
75	S/C	150.60	251.25	151.36	0.76	0.0075
16	S/C/Bs	140.20	236.48	140.76	0.56	0.0058

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.2.3.- Detalle de Concentración día 25, 1° exp.

Paila	Recubrimiento	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)	Concentración (gr/gr)
3	S	141.15	340.68	141.95	0.80	0.0040
25	S/Bs	97.30	203.60	98.12	0.82	0.0077
75	S/C	150.60	280.57	151.01	0.41	0.0031
16	S/C/Bs	140.20	233.32	140.75	0.55	0.0059

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.2.4.- Detalle de Concentración día 15, 2° exp.

Paila	Recubrimiento	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)	Concentración (gr/gr)
3	S	141.15	319.53	142.13	0.98	0.0055
25	S/Bs	97.30	194.97	98.03	0.73	0.0074
75	S/C	150.60	256.38	151.07	0.47	0.0045
16	S/C/Bs	140.20	229.41	140.81	0.61	0.0069

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.2.5.- Detalle de Concentración día 20, 2° exp.

Paila	Recubrimiento	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)	Concentración (gr/gr)
3	S	141.15	328.78	142.30	1.15	0.0061
25	S/Bs	97.30	196.52	97.89	0.59	0.0059
75	S/C	150.60	251.05	151.29	0.69	0.0069
16	S/C/Bs	140.20	238.97	140.87	0.67	0.0067

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.2.6.- Detalle de Concentración día 25, 2° exp.

Paila	Recubrimiento	Tara (gr)	Tara+Suelo húmedo (gr)	Tara+Suelo seco (gr)	Suelo seco (gr)	Concentración (gr/gr)
3	S	141.15	333.49	142.19	1.04	0.0054
25	S/Bs	97.30	206.89	98.01	0.71	0.0065
75	S/C	150.60	251.66	151.12	0.52	0.0052
16	S/C/Bs	140.20	233.75	140.83	0.63	0.0067

Fuente: Elaboración Propia

E.3.- Material Erodado Total.**Tabla E.3.1.- Detalle Total Erodado día 15, 1° exp.**

Recubrimiento	Canal (gr)	Bidón (gr)	Total (gr)
S	1046.57	80.60	1127.17
S/Bs	774.46	34.46	808.92
S/C	814.72	26.45	841.17
S/C/Bs	693.34	27.32	720.66

Fuente: Elaboración Propia**Tabla E.3.2.- Detalle Total Erodado día 20, 1° exp.**

Recubrimiento	Canal (gr)	Bidón (gr)	Total (gr)
S	974.89	53.07	1027.96
S/Bs	725.40	40.15	765.55
S/C	763.85	46.51	810.36
S/C/Bs	650.09	23.10	673.19

Fuente: Elaboración Propia**Tabla E.3.3.- Detalle Total Erodado día 25, 1° exp.**

Recubrimiento	Canal (gr)	Bidón (gr)	Total (gr)
S	1015.31	40.69	1056.00
S/Bs	748.67	54.38	803.05
S/C	756.65	21.60	778.25
S/C/Bs	678.10	25.32	703.42

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.3.4.- Detalle Total Erodado día 15, 2° exp.

Recubrimiento	Canal (gr)	Bidón (gr)	Total (gr)
S	994.96	53.27	1048.23
S/Bs	795.63	49.35	844.98
S/C	779.11	30.99	810.10
S/C/Bs	659.73	30.16	689.89

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.3.5.- Detalle Total Erodado día 20, 2° exp.

Recubrimiento	Canal (gr)	Bidón (gr)	Total (gr)
S	978.18	56.43	1034.61
S/Bs	718.98	39.18	758.16
S/C	757.90	41.47	799.37
S/C/Bs	643.71	26.20	669.91

Fuente: Elaboración Propia

Tabla E.3.6.- Detalle Total Erodado día 25, 2° exp.

Recubrimiento	Canal (gr)	Bidón (gr)	Total (gr)
S	988.71	52.71	1041.42
S/Bs	733.33	43.98	777.31
S/C	774.49	34.13	808.62
S/C/Bs	658.27	27.92	686.19

Fuente: Elaboración Propia

ANEXO F: SÓLIDOS VOLÁTILES Y MINERALES.

Para esto fue necesario determinar los porcentajes de sólidos volátiles y minerales del suelo puro y biosólido puro lo cual se muestra en la tabla F.1. Estos parámetros nos permiten poder dilucidar si el material erodado corresponde a suelo, biosólido o una mezcla de ambos.

Tabla F.1.- Porcentajes de diferenciación.

Muestra	Tara crisol (gr)	Tara + Masa seca (gr)	Tara + Masa carb. (gr)	% Sólidos Volátiles	% Solidos Minerales
Biosólidos	25.34	44.69	35.07	49.7%	50.3%
Suelo	22.81	50.50	48.17	8.40%	91.6%

Fuente: Elaboración Propia.

En las tablas F.2 y F.3 se presentan los resultados obtenidos para las seis muestras analizadas durante la primera y segunda experiencia.

Tabla F.2.- Diferenciación Suelo – Biosólido 1° experiencia.

Día	Muestra	% SV	% SM	% Suelo	% Biosólido	Masa Suelo (gr)
15	S/Bs	7.74	92.26	100	0	808.92
15	S/C/Bs	8.05	91.95	100	0	720.66
20	S/Bs	7.59	92.41	100	0	765.55
20	S/C/Bs	7.35	92.65	100	0	673.19
25	S/Bs	8.31	91.69	100	0	803.05
25	S/C/Bs	6.17	93.83	100	0	703.42

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla F.3.- Diferenciación Suelo – Biosólido 2° experiencia.

Día	Muestra	% SV	% SM	% Suelo	% Biosólido	Masa Suelo (gr)
15	S/Bs	8.21	91.79	100	0	844.98
15	S/C/Bs	5.63	94.37	100	0	689.89
20	S/Bs	7.83	92.17	100	0	758.16
20	S/C/Bs	8.18	91.82	100	0	669.91
25	S/Bs	5.62	94.38	100	0	777.31
25	S/C/Bs	6.54	93.46	100	0	686.19

Fuente: Elaboración Propia.