

UNIVERSIDAD DEL BÍO - BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke

“ESTIMACIÓN DE LA ERODABILIDAD DE UN SUELO MEZCLADO CON BIOSÓLIDOS”

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el Título de
Ingeniero Civil

OSVALDO ALEJANDRO REYES GARCÉS

Concepción, Noviembre de 2013

*Dedicado a mis padres Patricia y Osvaldo
Por confiar siempre en mí*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme salud y sabiduría para llegar hasta esta ansiada etapa en mi vida y la de mi Familia. Reconozco el incondicional apoyo y confianza que me han entregado mis padres Patricia y Osvaldo durante estos años, incentivando y motivando mi accionar. También quiero destacar la colaboración de un colega y amigo, David, quién me ayudó en la etapa experimental de la investigación. Sin olvidar la compañía y confianza que me entregó Yeniffer, ayudándome a dar término a esta etapa, que marca el inicio de una nueva vida.

Doy gracias a mis ex compañeros y amigos que formé durante todo este proceso, con quienes compartimos alegrías, penas y largas jornadas de estudio, que a pesar de los años transcurridos siguen estando presentes.

Finalmente quiero agradecer a mi profesor guía Álvaro Suazo quien dedicó su tiempo y buena disposición para dar fin a este proceso de proyecto de título.

NOMENCLATURA

USLE	Ecuación universal de pérdida de suelo.
MUSLE	Ecuación universal de pérdida de suelo modificada.
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

1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Objetivos.....	5
1.1.1 <i>Objetivo General</i>	5
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	5
2 ANTECEDENTES GENERALES.....	6
2.1 Modelos Para Determinar la Erosión hídrica.....	6
2.1.1 <i>Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)</i>	7
2.1.2 <i>Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE)</i>	13
3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
3.1 Selección del Suelo.....	17
3.2 Biosólidos.....	17
3.3 Ensayo de Laboratorio.....	18
3.3.1 <i>Procedimiento del Ensayo</i>	19
3.4 Ensayo en Terreno.....	20
3.4.1 <i>Sistema de Lluvia Artificial</i>	21
3.4.2 <i>Procedimiento del Ensayo en Terreno</i>	22
3.5 Ensayo Para la Determinación de la Materia Orgánica.....	23
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	24
4.1 Material Erosionado.....	24
4.1.1 <i>Ensayos de Laboratorio</i>	24
4.1.2 <i>Ensayos en Terreno</i>	26
4.2 Análisis de la Erodabilidad.....	27
4.2.1 <i>Ensayos de Laboratorio</i>	27
4.2.2 <i>Ensayos en Terreno</i>	28

4.3 Contenido de Materia Orgánica.....	29
4.4 Comparación con Método MUSLE	31
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32
REFERENCIAS	34
ANEXO A: ANTECEDENTES GENERALES.....	38
ANEXO B: METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS	43
ANEXO C: CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	47
ANEXO D: REGISTRO DE MATERIAL EROSIONADO	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Nomograma de erodabilidad de suelos (Fuente: Mancilla, 2008)	11
Figura 2. Sistema de goteo (Fuente: Elaboración propia)	18
Figura 3. Vista lateral proyectada del lisímetro de 25% de pendiente	20
Figura 4. Material erosionado para distintas dosificaciones de biosólido sometido a goteo	24
Figura 5. Promedios, máximos y mínimos de material erosionado según dosificación de biosólidos en lisímetros.	25
Figura 6. Material erosionado según dosificación de biosólidos en lisímetros.	26
Figura 7. Promedios, máximos y mínimos de material erosionado según contenido de materia orgánica.	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Códigos USLE de estructura del suelo	9
Tabla 2.	Códigos USLE de permeabilidad del suelo	10
Tabla 3.	Proporción de suelo – biosólido a ensayar con sus respectivas repeticiones.....	20
Tabla 4.	Erodabilidad K para las distintas dosificaciones de Biosólido.	28
Tabla 5.	Porcentajes de materia orgánica para los ensayo de laboratorio y terreno	29
Tabla 6.	Obtención del Factor K de erodabilidad del suelo en estado natural.....	31

ESTIMACIÓN DE LA ERODABILIDAD DE UN SUELO MEZCLADO CON BIOSÓLIDOS

Autor: Osvaldo Reyes Garcés

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
oreyes@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Dr. Álvaro Suazo Schwencke

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío
asuazo@ubiobio.cl

RESUMEN

Los biosólidos son utilizados como agente remediador de suelos que se encuentran degradados, formando una capa protectora que evita o disminuye la erosión debido a su alto contenido de materia orgánica. El objetivo de este proyecto es estudiar y analizar la erodabilidad de mezclas suelo-biosólido, mediante una serie de ensayos en laboratorio con probetas no drenadas y ensayos en terreno, con lisímetros de 25% de pendiente, para distintas dosificaciones de biosólidos. Los valores fueron obtenidos a través del método de goteo y de lluvia artificial, respectivamente; además se midió el contenido de materia orgánica en cada dosificación. Posteriormente, con los valores adquiridos de la erosión se logró determinar de manera cualitativa y cuantitativa la erodabilidad K para las distintas dosificaciones de biosólidos. Finalmente, se puede concluir que al aumentar la dosificación de biosólidos disminuye el valor del factor K y en consecuencia el material erosionado. Las reducciones de material erodado oscilan en un rango de 46% a 97% para el caso de los ensayos de laboratorio y un rango de 66% a 87% en el caso de los ensayos en terreno, siendo de esta manera la incorporación de biosólidos muy beneficiosa para la protección de taludes.

Palabras claves: Erosión, Erodabilidad, lisímetros, probetas no drenadas, biosólidos.

Palabras totales: 6692 Palabras Texto + 13 Figuras/Tablas*250 = 9942 Palabras Totales

ESTIMATION OF SOIL ERODIBILITY IN BIOSOLIDS-SOIL MIXTURE

Author: Osvaldo Reyes Garcés

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

oreyes@alumnos.ubiobio.cl

Professor Sponsor: Álvaro Suazo Schwencke

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío

asuazo@ubiobio.cl

ABSTRACT

Biosolids are used as soil ameliorants in degraded soils, creating a protective layer that reduces erosion due to its high organic matter content. The purpose of this project is to study and analyze erodibility of biosolids-soil mixtures by means of a set of laboratory tests with undrained tubes, and field tests with 25% slope lysimeters using several biosolids doses. Values for eroded material were obtained for both tests employing the drip method and the simulated rainfall method, respectively. In addition, organic matter content was measured in each dose. Subsequently, based on the values previously obtained it was possible to identify K erodibility from the qualitative and quantitative point of view. Eroded material was reduced by 46% to 97% in the case of laboratory tests, and 66% to 87% in the case of field tests, with biosolids addition proving useful for slope protection.

Key words: Erosion, erodibility, lysimeters, undrained tubes, biosolids

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diversas alternativas para el uso de biosólidos como agente remediador del suelo, ya que modifican favorablemente las características físicas, químicas y biológicas del mismo, por su alto contenido de materia orgánica. Esto ocurre principalmente en aquellos suelos que se encuentran mayormente degradados o cuyas propiedades naturales han sido negativamente afectadas, y en consecuencia los biosólidos son utilizados como capa protectora para evitar o disminuir la erosión.

Para predecir fenómenos tales como la erosión, esencialmente la erosión hídrica, existe un método que permite evaluar de forma teórica a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). A la hora de aplicar esta ecuación existen limitaciones, ya que puede ser utilizada sólo en grandes extensiones de terreno y con cierta duración de precipitaciones anuales. De esta manera, surge una modificación a la ecuación, que permite incorporar el efecto de una tormenta conocida para obtener la erosión, siendo conocida como Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE).

En ambas ecuaciones se requiere conocer la erodabilidad del suelo (K), la cual se puede estimar en función de las características del suelo mediante una ecuación o con el uso de un nomograma. No obstante, la cantidad de materia orgánica en el suelo está restringida a 12%. Al mezclar biosólidos con el suelo, el contenido de materia orgánica es mayor, por lo que se requiere estimar la erodabilidad del suelo en este caso.

Debido a lo antes mencionado es que se hace interesante estudiar el comportamiento de las mezclas suelo – biosólidos con diferentes dosificaciones de lodos, y así poder cuantificar la pérdida de suelos.

El presente proyecto de título, busca aportar a esta materia llevando a cabo una investigación a escala con ensayos de laboratorio, utilizando los métodos propuestos por Manzo (2010) y Riquelme (2010). En el primero se realizan estudios de erosión con probetas y en el segundo se realizan estudios con taludes a escala (lisímetros), en ambos con la finalidad de obtener la cantidad de suelo erosionado. De esta forma se evaluarán cambios de la erodabilidad para mezclas en distintas dosificaciones de suelo – biosólido. El objetivo de esta investigación es

estudiar la erodabilidad para un suelo mezclado con distintas concentraciones de biosólidos y que contenga una cantidad de materia orgánica mayor al 12%, mediante lisímetros y ensayos de goteo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

- Estimar la erodabilidad de un suelo mezclado con distintas concentraciones de biosólidos y que contenga una cantidad de materia orgánica mayor al 12%, mediante lisímetros y ensayos de goteo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la cantidad de material erodado en suelos mezclados con biosólidos, utilizando el método de goteo en una probeta y en un lisímetro.
- Comparar la erodabilidad (K) obtenida por el método de goteo en una probeta con el obtenido en lisímetro con pendiente.
- Comparar los valores de erodabilidad obtenidos en los ensayos con el método MUSLE.

2. ANTECEDENTES GENERALES

El tratamiento de las aguas servidas en Chile y en la región se ha incrementado sustancialmente en los últimos años. En la región del Biobío hace más de una década que existen plantas de tratamientos de aguas servidas, cuya operación da origen a residuos conocidos como biosólidos. Existen diversas alternativas para la disposición final de lodos, como la incineración, disponerlos en rellenos sanitarios, utilizarlos para la producción de biogás o entre las opciones destaca la incorporación al suelo, luego de un proceso de estabilización.

Por otra parte, la gran cantidad de precipitaciones anuales y otros factores, entre los que destacan las características propias del suelo (erodabilidad) y la acción del ser humano, es que los suelos se ven afectados por la erosión hídrica; fenómeno que constituye a la degradación de la superficie terrestre.

Dado estos argumentos, la opción de uso de lodos para mejorar suelos degradados, así como para mejorar su productividad agrícola, es una alternativa conveniente y poco costosa; ya que contiene, nutrientes indispensables para las plantas, como nitrógeno, fósforo, potasio y también micronutrientes. Además, el contenido de materia orgánica del lodo (medida usualmente como sólidos volátiles), que puede ser superior al 40% en peso seco, ayuda a mejorar la estructura del suelo e incrementa su capacidad de retención de agua (HARRIS - PIERCE, 1994; EPSTEIN, 2003)

2.1 Modelos Para Determinar la Erosión hídrica

Para la estimación o medición del grado de erosión existente en el suelo se han desarrollado distintos métodos, los cuales se han diferenciado en dos tipos; los modelos cualitativos y los modelos cuantitativos. En los modelos cualitativos destaca la cartografía de unidades homogéneas en función de los parámetros principales que controlan el proceso erosivo (erosividad de la lluvia, suelo, vegetación, topografía), con otros atributos de ajustes más subjetivos (Honorato et al., 2001). Por otra parte, los modelos cuantitativos permiten la estimación numérica de la erosión y se diferencian en modelos de evaluación directa y de modelos de evaluación indirecta, donde estos últimos son los de mayor aplicación en la actualidad.

Los métodos de evaluación indirecta están asociados a modelos que son representaciones simplificadas de la realidad (Honorato et al., 2001). Entre éstos se pueden distinguir modelos estadísticos, modelos físicos y modelos paramétricos. Dentro de este último grupo se presenta el modelo empleado para cuantificación de la pérdida de suelos producto de la erosión hídrica, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Wischmeier y Smith, 1978) y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada (Williams J., 1975).

2.1.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

USLE es un modelo orientado a la predicción de pérdida de suelo por acción de la lluvia, en regiones medianamente extensas (parcelas, fincas) y escala de tiempo anual. Concebido originalmente para estimaciones en cultivos específicos, se ha extendido su uso a terrenos de todo tipo debido a su simplicidad y amplia base de datos sobre la cual fue desarrollado. Sin embargo, posee limitaciones, ya que los métodos para estimar los factores involucrados no se encuentran disponibles en muchos lugares fuera de EE.UU y está basado sobre el supuesto de pendiente, suelos, cultivo y manejo uniformes. Además, no fue diseñado para estimar pérdidas de suelos en cuencas complejas.

Este método resulta apropiado para las siguientes aplicaciones:

- Predicción de la pérdida anual promedio de suelo, de un campo agrícola con pendiente y condiciones de uso específico.
- Estimar tasas de erosión para guiar prácticas de control de la misma.
- Determinar o verificar pendientes apropiadas para cultivos.

En la ecuación 1 se muestra la representación matemática de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde,

- A : Pérdida de suelo promedio anual [ton/ha/año]
 R : Factor erosividad de la lluvia [MJ/ha*mm/h]
 K : Factor erodabilidad del suelo [ton/haMJ*ha/mm*h]

- L : Factor longitud de pendiente [m]
 S : Factor pendiente [adimensional]
 C : Factor de ordenación de los cultivos (cubierta vegetal)
 P : Factor de prácticas de conservación (estructura del suelo)

i) *Pérdida de suelo (A)*

Es el promedio de la pérdida del suelo, en ton/(ha*año)

ii) *Factor erosividad de la lluvia (R)*

Se refiere a la erosividad que tienen las lluvias (agresividad climática) de una zona y por consiguiente expresa el número de lluvias erosivas (unidades de índice de erosión EI) que ocurren en un año normal.

El índice se basa en que la pérdida de suelo en campos desnudos, es directamente proporcional al producto de la energía cinética total de la lluvia, multiplicada por su intensidad máxima desarrollada durante 30 minutos continuos. La suma de estos productos llamados EI, para un período dado (año) proporciona un índice de erosión numérico de las lluvias que inciden sobre la erosión potencial de las mismas durante ese período.

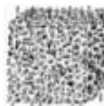
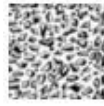




iii) *Factor suelo (K)*

El factor suelo en la USLE se refiere a su erodabilidad, es decir, es la resistencia del suelo frente a la agresividad de la lluvia. Este factor puede ser determinado de manera directa a través de una ecuación o bien de manera gráfica. Cualquiera sea el método a emplear se deben determinar previamente las siguientes propiedades:

- **Textura:** asociada a las fracciones de limo, arcilla, arena muy fina y arena que contiene el suelo. El método USLE establece que, para efectos de erosión, el limo y la arena muy fina se comportan de manera similar.
- **Materia orgánica:** Contenido porcentual de materia orgánica del suelo determinada por el método de Walkley-Black. Varía entre 0 y 4%, si el valor es mayor al rango especificado, se asume 4%.

- **Estructura del suelo:** asociada a las características de las partículas que constituyen el suelo (ver tabla 1).
- **Permeabilidad:** USLE asigna códigos de acuerdo a la permeabilidad del suelo (ver tabla 2).

Tabla 1. Códigos USLE de estructura del suelo

Código USLE	Tipo de Estructura	
1	Granular muy fina	
2	Granular fina	
3	Granular media a gruesa	
	Bloques	
4	Laminar	
	Masiva	

(Fuente: Mancilla, 2008)

Tabla 2. Códigos USLE de permeabilidad del suelo

Código USLE	Categoría de Permeabilidad
1	Rápida (más de 12,7 cm-h ⁻¹)
2	Moderada a rápida (6,3 a 12,7 cm-h ⁻¹)
3	Moderada (entre 2 y 6,3 cm-h ⁻¹)
4	Lenta a moderada (entre 0,5 y 2 cm-h ⁻¹)
5	Lenta (entre 0,13 y 0,5 cm-h ⁻¹)
6	Muy lenta (menor a 0,13 cm-h ⁻¹)

(Fuente: Mancilla, 2008)

a) Método de la ecuación

Una vez determinado los valores de las propiedades nombradas anteriormente se está en condiciones de determinar el valor del factor K a partir de la Ecuación 2 que establece el método USLE.

$$K = 1.313 \cdot [2.1 \cdot 10^{-4} \cdot (12 - MO) \cdot M^{1.14} + 3.25 \cdot (s - 2) + 2.5 \cdot (p - 3)]/100 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde,

- K : factor de erodabilidad del suelo
- MO : contenido de materia orgánica del suelo [%]
- s : código de estructura del suelo
- p : código de permeabilidad del suelo
- M : (% limo + arena muy fina)*(100 - % arcilla)

b) Método gráfico

La obtención del factor K a través del método gráfico se realiza utilizando el nomograma de erodabilidad de suelos (Figura 1). Para ingresar el nomograma se comienza con el porcentaje de limo más arena muy fina en el gráfico izquierdo. A partir de este valor, se proyecta una línea recta hasta interceptar la curva representativa del porcentaje de arena del suelo en cuestión. Desde ese punto se proyecta verticalmente la línea hasta llegar a la curva que representa el porcentaje de materia orgánica del suelo. Desde allí se continúa hacia la derecha cruzando la primera

aproximación del valor K, la cual es útil si no se dispone de los antecedentes de estructura o permeabilidad. De esta manera se ingresa al gráfico derecho, continuando la proyección realizada, hasta interceptar la línea correspondiente al código de estructura en cuestión. Desde ese punto, se desciende por el gráfico hasta tocar la línea que representa el código de permeabilidad adecuado al suelo en estudio. Finalmente desde ese punto se traza la línea recta hacia la izquierda de gráfico, obteniendo el factor correspondiente a la erodabilidad del suelo K.

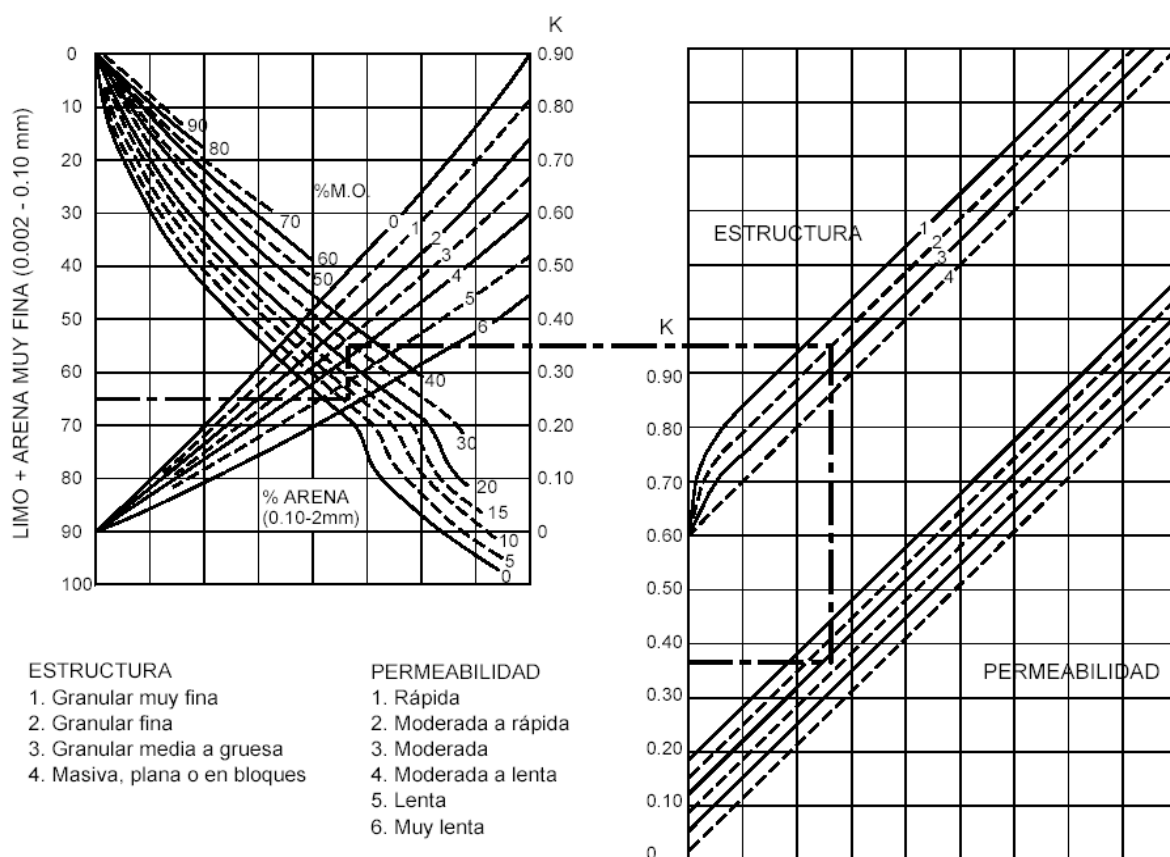


Figura 1. Nomograma de erodabilidad de suelos (Fuente: Mancilla, 2008)

En la figura 1 se puede observar con línea segmentada un ejemplo de la estimación de K para un suelo con 65% de limo más arena muy fina, 5% de arena, 3% de materia orgánica, estructura granular fina y permeabilidad lenta a moderada, quedando un valor de $K = 0,38$

Los valores de K varían entre 0 y 1, donde 0 es la condición menos susceptible a la erosión y 1 la condición más desfavorable. Así, por ejemplo, suelos de textura fina con alto contenido de arcilla tienen valores bajos de K (0,05-0,15), porque poseen resistencia al desprendimiento a partir de su cohesión, mientras que suelos de textura mediana tienen valores moderados de K (0,25-0,4) ya que presentan bajas tasas de escurrimiento superficial debido a su permeabilidad (Antezana, 2001). Luego, es de esperar que los valores más elevados de K estén asociados a los suelos en que predomina el limo, dado que estos no poseen cohesión ni buena capacidad de infiltración.

iv) *Factor longitud de pendiente (L)*

El Factor de longitud de pendiente relaciona las pérdidas de un campo de cultivo de longitud y pendiente conocida con las de una parcela experimental de dimensiones estándar (22,13 m de largo y 9 % de pendiente). Se puede calcular a través de la ecuación 3.

$$L = \left(\frac{l}{22,13} \right)^m \quad \text{Ec. (3)}$$

Dónde:

l = Longitud de la ladera considerada en m.

m = exponente que depende del tipo de pendiente.

- m = 0,6 para pendiente > 10%.
- m = 0,5 para pendientes entre 3% a 10%.
- m = 0,3 para pendiente < 3% y de mucha longitud.

v) *Factor pendiente (S)*

El Factor pendiente es una relación que compara la pérdida de suelo de una pendiente cualquiera, con la de un campo experimental de pendiente estándar (9 %). Se puede obtener a través de la ecuación 4.

$$S = \frac{0,43 + 0,30 \cdot s + 0,043 \cdot s^2}{6,613} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde s = pendiente en %.

vi) *Factor cultivo (C)*

El Factor de cultivo C de USLE representa el grado de protección que un determinado tipo de cubierta vegetal ofrece al suelo, en oposición al resto de las variables que facilitan la erosión hídrica. En sí, este factor aparece como el más subjetivo, puesto que su determinación se asocia a antecedentes puntuales de investigaciones más que datos de una planificación seria y constante. En general para determinar el factor de cultivo C existen tabulaciones y no ecuaciones, existen variadas tablas publicadas de valores del factor, pero se deberían escoger aquellas que reflejen mejor el tipo de cultivo o de vegetación de cada región. Finalmente para suelos en donde se ha removido toda la cubierta vegetal y no se han dejado rastro alguno de vegetación se puede asumir $C=1$. (Mancilla, 2008).

vii) *Factor prácticas de conservación (P)*

Este factor representa la reducción de las pérdidas de suelo cuando se emplean las técnicas de conservación, en comparación con las que ocurrirían si no se aplicaran. Permite evaluar la eficacia de diversas técnicas de conservación de suelos en la reducción de la erosión y ser utilizado como instrumento de gestión, ya que si se fija una pérdida máxima tolerable de suelo, indica las prácticas de conservación más eficientes para conseguir este objetivo. Este factor toma el valor 1 en la peor de las situaciones, es decir, con el suelo al desnudo, labrado en el sentido de la máxima pendiente, y su valor disminuye cuanto más eficiente sea la medida tomada. Entre las prácticas de conservación habituales estarían el cultivo a nivel, la construcción de terrazas y bancales, el cultivo en franjas y las técnicas de laboreo mínimo (Mancilla, 2008).

2.1.2 *Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE)*

La ecuación modificada de pérdida de suelo fue desarrollada por Williams J.R en 1975. Es la extensión del modelo USLE, aun cuando se formule de manera distinta, pues su propósito difiere de forma sustancial: ya no se trata de hacer una estimación promediada a largo plazo, sino de calcular el aporte de sedimentos de un evento singular, aplicado a pequeñas cuencas hidrográficas, utilizando un factor de escurrimiento para reemplazar el factor de energía pluvial de la ecuación universal de pérdida de suelo. Cuando las cuencas presentan homogeneidad en los factores constituyentes del modelo, es recomendable utilizar esta ecuación en las que tengan una

superficie alrededor de 100 Km², en caso contrario se recomienda utilizar en pequeñas cuencas de 25 Km².

Se observa en la Ecuación 5:

$$Y = 11,18 \cdot (Q \cdot q_p)^{0,56} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \text{Ec. (5)}$$

Dónde:

Y: Es la cantidad de sedimento que se producen por una tormenta específica (ton/ha)

Q: volumen de escurrimiento por tormenta (m³)

q_p = caudal instantáneo máximo (m³/s)

K: erodabilidad del suelo, en (ton/ha*año/MJ*mm/ha/hr).

Los factores (L, S, C y P) son los mismos empleados en la ecuación universal de la pérdida de suelo.

2.2 Biosólidos

Los biosólidos son definidos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) como: “Residuos sólidos, semisólidos o líquidos generados durante el tratamiento de aguas servidas domiciliarias. Los biosólidos incluyen las escorias o sólidos removidos durante el tratamiento primario, secundario o avanzado del proceso de tratamiento de aguas servidas y cualquier material derivado de los lodos, excepto las gravillas o cenizas generadas durante el proceso de incineración” (Rámila et al., 2008).

En Chile, el Ministerio del Medio Ambiente, define lodos como: “Residuos semisólidos que hayan sido generados en plantas de tratamiento de aguas servidas”. El uso y manipulación de biosólidos, está regido por el Decreto Supremo N°4/2009, Ministerio de Secretaría General de la República.

En términos prácticos, los biosólidos están compuestos en su mayor parte por materia orgánica, nutrientes y agua; pudiendo contener restos de metales pesados, patógenos y otras impurezas no removidas en los procesos de tratamiento.

Estas fracciones son las que caracterizan el lodo y varían de acuerdo a diversos factores, entre los que se pueden destacar:

- Caracterización del afluente de las Plantas de Tratamientos de Aguas Servidas (PTAS).
- Diseño y operación de la PTAS.
- Etapa de extracción de los biosólidos.
- Procesos involucrados en la línea de lodos.

2.2.1 Clasificación Sanitaria

Los lodos se clasifican en las siguientes categorías de acuerdo al Decreto Supremo N°4/2009, Ministerio de Secretaría General de la República:

- **Lodo clase A:** Son aquellos que poseen virtual ausencia de patógenos y reducción en el nivel de componentes degradables que atraen vectores. No poseen restricción sanitaria para la aplicación en suelo.
- **Lodo clase B:** Son aquellos que presentan una reducción del potencial de atracción de vectores, pero no logran una reducción en el contenido de patógenos que les permita ser clasificados como clase A. Este lodo es apto para la aplicación en suelo, posee restricciones sanitarias en su aplicación según el tipo y localización de suelos o cultivos.

Entonces, se entiende por lodo estabilizado (o con reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios) todo lodo al que se le ha reducido en al menos, un 38% el contenido de sólidos volátiles. Sin embargo, se establecen situaciones particulares en el tratamiento que reciben los lodos, considerándose estabilizados pese a no alcanzar una reducción de sólidos volátiles de 38%.

Los lodos clasificados como clase A y B, son lodos estabilizados a pesar de presentar diferencias significativas en su contenido de patógenos. En rellenos sanitarios y en la aplicación en suelos, se exige que el lodo utilizado sea por lo menos clase B.

2.2.2 Aplicación al Suelo

Los biosólidos son ricos en nutrientes (nitrógeno, potasio y fósforo principalmente) y materia orgánica, elementos fundamentales para el desarrollo de especies vegetales. Su incorporación

aumenta la porosidad del suelo produciendo aumentos en la tasa de infiltración y capacidad de campo, traduciéndose en mayor disponibilidad de agua para las plantaciones. Es incorporado por sus propiedades remediadoras de las condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos, representando una alternativa sustentable en la disposición final de los lodos.

Estas propiedades convierten a los lodos en un buen abono orgánico, siendo utilizado de manera masiva en países desarrollados en cultivos agrícolas, forestales y en terrenos donde se desea desarrollar una cubierta vegetal como método de control de la erosión.

En cuanto a las desventajas de su uso, el arrastre por escorrentía superficial de fracciones de suelo mejorado con biosólido puede provocar eutrofización en el cuerpo de agua receptor, debido al alto contenido de nutrientes de la descarga. Cuando se trata de lugares turísticos, afecta negativamente, ya que perturba el entorno visual e interfiere con las actividades que ahí se desarrollan.

En términos de salud, existen campañas de desprestigio hacia la utilización de biosólidos, por parte de los fabricantes de fertilizantes químicos (Vélez, 2007), a pesar de no existir antecedentes que señalen que la utilización de biosólidos como abono, modifica negativamente la calidad de los cultivos.

En Chile, actualmente las dosificaciones varían de acuerdo a su aplicación (agronómica, forestal, suelos degradados, etc.), donde la cantidad a utilizar está determinada por el terreno y se rige por la norma por el Decreto Supremo N°4/2009, Ministerio de Secretaría General de la República.

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describe el procedimiento utilizado para dar cumplimiento a los objetivos planteados en este proyecto de título, donde se incluyen ensayos de laboratorio y terreno, que tienen como finalidad determinar la erodabilidad del suelo estudiado.

3.1 Selección del Suelo

Se espera representar la realidad de la región del Biobío, a través de muestras de suelo extraídas en la Universidad del Bío-Bío, en Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente (LAGEMA), el cual es de tipo arena-limosa (SM), de acuerdo con U.S.C.S. Se entregan los siguientes resultados según las normas NCh 1534 of 79, NCh 165 of 77 y la NCh 1516 of 79. Ver anexo C.

- Densidad natural húmeda: 1583 kg/m³.
- Densidad compactada seca: 1254kg/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%
- Tipo de estructura:1
- Rango de Permeabilidad:4
- Contenido de Materia Orgánica: 8%

3.2 Biosólidos

Los biosólidos o lodos activos utilizados a lo largo de toda esta experiencia son los provenientes de la Planta de tratamiento de Aguas Residuales ubicada en Hualpén, Región del Bío-Bío.

La línea de lodos está compuesta por: digestor anaeróbico, prensa banda y cancha de secado; siendo en esta última fase donde fueron extraídos los biosólidos usados en este trabajo. En esta

etapa, la planta garantiza una clasificación sanitaria clase B, aunque dados los procesos involucrados, se podría estar en presencia de lodos clase A. Pese a esto, la planta no mantiene registros del contenido de patógenos, razón por la cual solo puede acreditar lodos clase B.

Los registros de humedad de los biosólidos que egresan de la planta se encuentran alrededor del 70%, respecto a la masa total. Mediante ensayos se determinó su humedad, los cuales arrojan un valor promedio de 219% respecto de la masa seca.

3.3 Ensayo de Laboratorio

Este ensayo es realizado con el método propuesto por Manzo (2010), quien ideó y construyó un sistema de goteo que simula la acción de una lluvia vertical, sobre una muestra de suelo y permite determinar pérdidas por concepto de erosión hídrica, directamente asociadas a la erodabilidad.

El sistema consta de un recipiente o estanque que contiene el agua y una aguja en su parte inferior por la que salen las gotas de agua. Este sistema de goteo está sobre un recipiente que contiene una probeta con suelo a ensayar y que tiene la función de receptionar el material expulsado de la misma, junto con la escorrentía superficial. Manzo (2010) propone como recomendación, que la aguja debe ser de N°19 y ésta debe estar a 50 cm sobre la probeta a ensayar. Las probetas a utilizar son no drenadas y fabricadas con tubos de PVC con diámetro interior de 21 mm y una altura de 25 mm. Éstas son adheridas con silicona sobre una base de acrílico. La figura 2 muestra el sistema de goteo completo

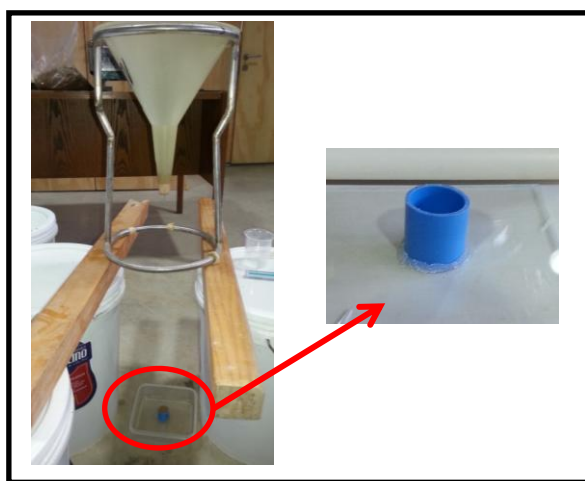


Figura 2. Sistema de goteo (Fuente: Elaboración propia)

El sistema de compactación desarrollado por Manzo (2010), tiene como objetivo entregar a la muestra un nivel de compactación similar al que posee en estado natural el suelo. Según el autor, varía en un rango de 65 a 80% de la Densidad Máxima Compactada Seca (DMCS) determinada en un ensayo Proctor Modificado.

En el caso de los biosólidos, la incapacidad de aplicar un ensayo Proctor, impide determinar si el nivel compactación se encuentra en el rango señalado; sin embargo, esto no viene al caso, ya que las mezclas suelo-biosólidos no se encuentran libres en la naturaleza y su nivel de compactación in situ está sujeto únicamente a la técnica de aplicación utilizada. Por lo tanto, se puede concluir que basta con entregar una energía de compactación constante a cada muestra para estandarizar las condiciones del ensayo, aunque los niveles de densidad alcanzados sean distintos, los cuales se muestran en mayor detalle en el anexo D.

3.3.1 Procedimiento del Ensayo

Este ensayo se realizó con distintas dosificación de biosólidos y un número de repeticiones establecido para cada dosis utilizada. De esta manera, se puede alcanzar un mayor nivel de confiabilidad en los resultados, con datos suficientes para ser llevados a estudios estadísticos. Las dosis de biosólidos utilizadas varían entre 0 y 100% con un total de 9 mezclas distintas. La dosificación de las muestras fue realizada de forma proporcional entre la masa de biosólidos seco y la masa de suelo seco en una determinada muestra. Para obtener las proporciones fue necesario descontar el contenido de agua presente en ambos materiales. La tabla 3 entrega información sobre las muestras ensayadas, ítems de masa de suelo y biosólidos, con la cantidad material húmedo aplicado por cada cien gramos de mezcla. El detalle paso a paso del procedimiento del ensayo de encuentra en el Anexo B.1.

Tabla 3. Proporción de suelo – biosólido a ensayar con sus respectivas repeticiones

Dosificación (%)	Masa Suelo (g)	Masa Biosólido (g)	N° de Repeticiones
0	100	0	30
3	76	24	6
6	71	29	6
9	66	34	6
12	61	39	6
25	45	55	6
50	23	77	30
75	10	90	6
100	0	100	30

(Fuente: Elaboración Propia)

3.4 Ensayo en Terreno

Para la realización de este ensayo se utilizan los lisímetros diseñados por Riquelme (2010), los cuales están ubicados en el Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente (LAGEMA). Además para esta experiencia los lisímetros son de una pendiente de 25%. En la Figura 3 se muestra una vista lateral proyectada del lisímetro de 25% de pendiente.

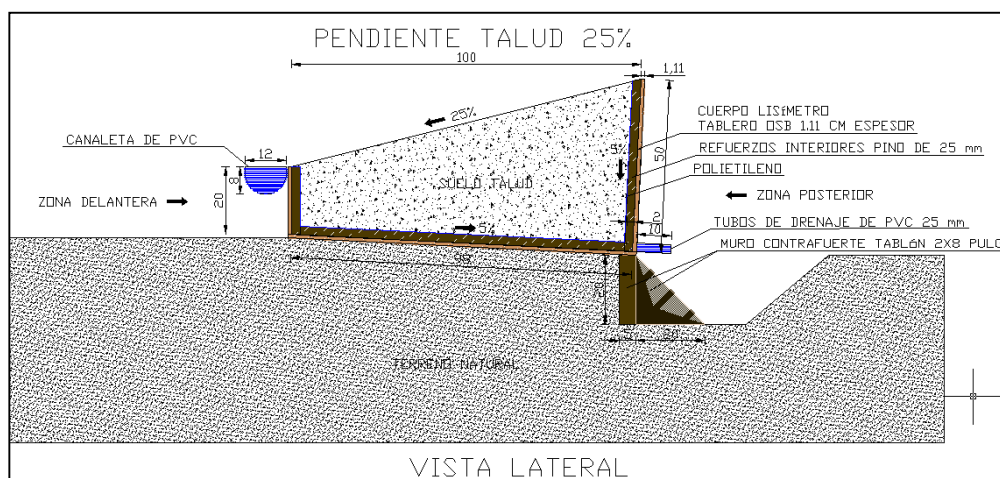


Figura 3. Vista lateral proyectada del lisímetro de 25% de pendiente (Fuente: Riquelme, 2010)

- Estrato I (inferior): 24 kilos de arena, utilizado como filtro para evitar que las partículas finas de suelo evacuen y además facilitar el drenaje del agua infiltrada.
- Estrato II (intermedio): Un suelo común de la región, arena limosa (SM), específicamente extraído de una ladera de un cerro ubicado en la Universidad del Bío-Bío.
- Estrato III (superior): Estrato diferente para cada lisímetro, en donde se elaborarán las diferentes mezclas de suelo – biosólido, con un espesor de 3 cm.

Estos lisímetros cuentan con sistema de retención de material erosionado que se compone de una canaleta en la parte inferior provista de una vía de evacuación de agua, la cual está conectada a través de una tubería de PVC a un bidón, el que se encuentra debidamente calibrado para cuantificar el volumen escurrido de mezcla agua-suelo hasta los 60 litros. El material erosionado decantado en la canaleta, sumado a la mezcla contenida en el bidón, componen el material total erosionado por el ensayo.

3.4.1 Sistema de Lluvia Artificial.

Para obtener la erosión hídrica se utiliza el sistema de lluvia artificial diseñado por Hernández (2011), que simula una lluvia artificial a través de un red de mangueras perforadas, que están amarradas en una parrilla de madera la que se monta a una estructura de madera. Este sistema de lluvia consta con un manómetro el que permite conocer la presión durante todo el ensayo, lo que permitiendo verificar si existe algún cambio de presión, propio de la red de agua potable de la Universidad del Bío-Bío, y principalmente poder controlar el caudal durante la realización de los ensayo.

Las principales características de este sistema 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 de precisión de 0,1 bar.
- Altura de la estructura de 3,2 m.
- Tiempo de precipitación de 5 minutos.

Para la realización de esta experiencia fue necesario verificar algunos datos para la condición actual del sistema de lluvia artificial. Para esto se determinó la cantidad total de agua precipitada, fue necesario obtener el caudal de trabajo a una presión de 0,5 bar, el cual dio como resultado 329 mm/hr. Por lo tanto el volumen total de agua precipitada, durante los 5 minutos de ensayo es de 27,4 lt.

3.4.2 Procedimiento del Ensayo en Terreno

Los ensayos están orientados a obtener la cantidad de material erosionado, a través de una precipitación conocida, para distintas dosificaciones de biosólidos. Para ello se realizaron tres repeticiones para tres casos diferentes los cuales se nombran a continuación:

- Suelo desnudo.
- Mezcla de suelo con 12% de biosólidos.
- Incorporación superficial de 100% de biosólido.

Para el caso de la incorporación de suelo desnudo se realizó un reperfilado de 3 cm incorporando el suelo en 2 capas de 25 Kg cada uno, donde se alcanzaron rangos entre un 79 y 81% de la DMCS. Estos resultados fueron determinados a través de ensayos de densidades, diseñado por Hernández (2011), el cual se basa principalmente en la extracción de testigos de suelo mediante probetas de PVC, los cuales son introducidos en distintos lugares (4) de los estratos superficiales de cada lisímetro. La mezcla de suelo con 12% biosólido, la dosificación se realizó de acuerdo a la tabla 3 y se utilizó el mismo sistema de compactación que el suelo desnudo.

Finalmente para la incorporación superficial de 100% biosólido fue aplicado en una capa de 3 cm, teniendo un peso igual a 15 kg de lodo por cada lisímetro. El método de compactación fue manual, ya que la adherencia del lodo-suelo fue complicada de realizar, debido a que el biosólido es un material extremadamente plástico y con una alta cohesión, impidiendo así poder compactar con el método propuesto por Riquelme (2010). La metodología para obtener densidades, la humedad, el material erodado en las canales y el material erodado en el bidón se muestra en detalle en el anexo B.2.

3.5 Ensayo Para la Determinación de la Materia Orgánica

Con el fin de tener una mayor cantidad de antecedentes experimentales que permitan analizar y comprender el comportamiento de las muestras suelo-biosólido en cuanto a la erodabilidad, se determinó el contenido de materia orgánica presente en los materiales utilizados, esto es, suelos y biosólido de manera independiente y también de las distintas mezclas. Ante la complejidad de realizar un ensayo de combustión húmeda (Walkley – Black), se optó por el método de pérdida de masa en conformidad a la norma ASTM-D4547 (1998).

4 .ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados en laboratorio y en terreno con las distintas dosificaciones utilizadas en cada uno. Además, se realizan las comparaciones entre ellos a través del método MUSLE.

4.1 Material Erosionado

A continuación se exponen las cantidades de material erosionado de las distintas mezclas de suelo - biosólido tanto para los ensayos en probetas realizados en laboratorio como aquellos en lisímetros en terreno.

4.1.1 Ensayos de Laboratorio

Para cada mezcla suelo – biosólido se realizaron varias repeticiones con el fin de obtener valores más confiables, los resultados de los ensayos se presentan en dos gráficos. El primer gráfico (figura 4) muestra los resultados de material erosionado en gramos para las distintas dosificaciones con sus respectivas repeticiones, y el segundo (figura 5) es un gráfico en escala logarítmica donde se observa por cada condición, el promedio de la cantidad de material erosionado con su máximo y mínimo valor. La tabla de resultados de los ensayos se encuentra en el anexo C.

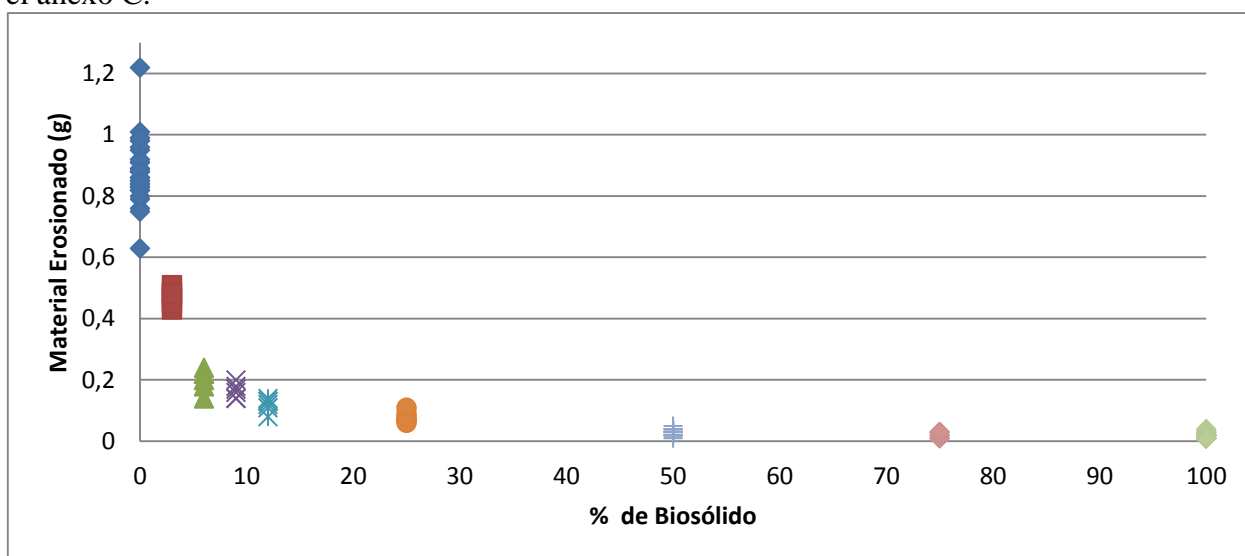


Figura 4. Material erosionado para distintas dosificaciones de biosólido sometido a goteo

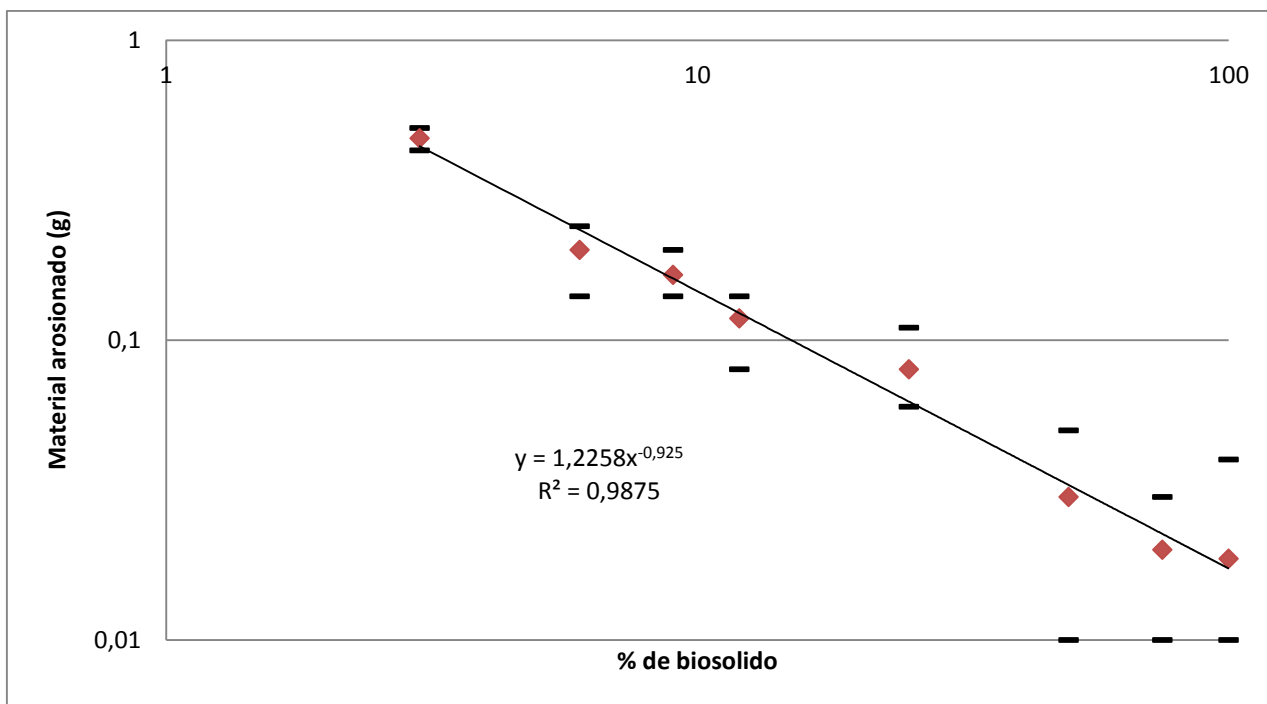


Figura 5. Promedios, máximos y mínimos de material erosionado según dosificación de biosólidos en lisímetros.

De la figura 4 se aprecia que la mayor dispersión está asociada a la dosificación 0% y tiene un valor de desviación estándar de 0,103 gramos, mientras que el valor mínimo observado tiende a 0 gramos y se registra para las dosificaciones del 50% en adelante. En el resto de las mediciones el valor de la desviación estándar se encuentra en el rango de 0,018 a 0,036 gramos. A simple vista se puede apreciar que predomina la tendencia de una curva decreciente, aunque también se podría contemplar un tramo final recto. Por otro lado, tenemos un valor promedio máximo de material erodado de 0,88 gramos que corresponde a la condición natural del suelo (0% de biosólidos) y un valor promedio mínimo de material erodado de 0,019 gramos, que se atribuye a la condición de 100% biosólidos.

Para obtener más detalles sobre los resultados se analiza la figura 5, la cual muestra los promedios del material erosionado con sus máximos y mínimos en escala logarítmica, para esto fue necesario no considerar la condición de 0% de dosificación, donde se le ajusta una línea de tendencia potencial la que nos entrega un $R^2 = 0,98$, es decir, que la línea de tendencia se ajusta bastante bien y de esta manera se encuentra una relación entre el % de biosólido con respecto del material erosionado, pero con una restricción de una dosificación mayor o igual al 3% de

biosólido.

4.1.2 Ensayos en Terreno

Se realizaron 3 ensayos con lisímetros de una pendiente de 25%, para 3 distintas dosificaciones de biosólidos con 3 repeticiones cada una. Los resultados del material erosionado v/s el % de dosificación de biosólidos se muestran en la figura 5, donde se puede observar por cada condición, el promedio, el máximo y mínimo de la cantidad de material erosionado. Tabla de resultados de los ensayos en terreno se muestran en el anexo D.

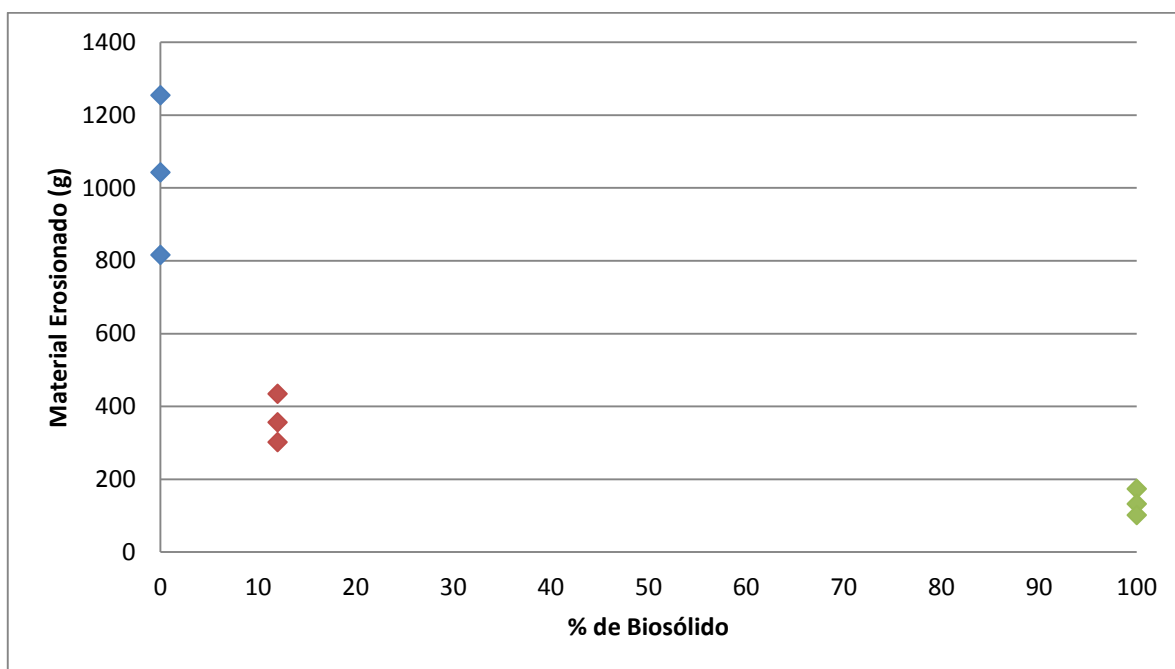


Figura 6. Material erosionado según dosificación de biosólidos en lisímetros.

La figura 6 muestra un valor promedio máximo de material erodado de 1042,63 gramos que corresponde a la condición natural del suelo (0% de biosólidos) y un valor promedio mínimo de material erodado de 132,5 gramos que se le atribuye a la condición de 100% biosólidos. Además, cabe destacar que al aplicar el 12% de biosólidos se obtuvo una disminución del 66% del material erosionado con respecto al suelo en estado natural y en el caso de la aplicación superficial de 100% biosólido se obtiene una disminución del 87% en relación al suelo en su estado natural.

La mayor dispersión está asociada a la dosificación 0% y tiene un valor de desviación estándar de 219,95 gramos, mientras que el valor mínimo observado es de 37,06 gramos y se registra para el caso de 100% biosólido. Se puede observar, al igual que en los ensayos de laboratorio, una clara tendencia que a mayor cantidad de biosólidos aplicados disminuye considerablemente la cantidad de material erodado.

A partir de estos resultados podemos comparar los porcentajes de reducción de material, con respecto al suelo desnudo, entre ambos experimentos se tiene que para la dosificación del 12% de biosólidos en el ensayo de laboratorio, se obtiene una reducción del material erosionado de 85,5% y para el caso de los lisímetros es de un 66%; y en el caso de la aplicación del 100% de biosólidos en el ensayo de laboratorio fue de 97,9% y para el ensayo en terreno fue de 87%. En ambos casos la disminución es mayor en los ensayos de laboratorio, esto se debe a que las probetas de laboratorio están expuestas solamente a la erosión por salpicadura y al aumentar la dosificación de biosólidos aumenta la cohesión de las partículas disminuyendo considerablemente la erosión por salpicadura, en cambio en el caso de los lisímetros, además de existir la este tipo de erosión también existe la erosión por arrastre superficial de partículas provocando una menor disminución.

4.2 Análisis de la Erodabilidad

El análisis de la erodabilidad (K) es el objetivo principal de esta investigación, para ello se cuantifica el material erosionado en la etapa experimental y utilizando la metodología MUSLE, se propone obtener los valores de la erodabilidad para los ensayos de laboratorio como también para los ensayos en terreno. Los valores de K varían entre 0 y 1, donde 0 es la condición menos susceptible a la erosión y 1 la condición más susceptible a la erosión.

4.2.1 Ensayos de Laboratorio

En este ensayo se puede observar que el Factor topográfico (LS) es complejo obtener su valor debido a que depende de la pendiente y la longitud de pendiente y como las probetas no poseen inclinación y la longitud es demasiado pequeña no es posible determinar el factor LS debido que los valores que corresponden a las probetas no se encuentran dentro del monograma y además están bastante alejados de los valores mínimos, en estricto rigor no se puede determinar un valor

de LS para el ensayo de laboratorio. Esta decisión impide la determinación de un valor de la erodabilidad K.

4.2.2 Ensayos en Terreno

Se realiza un análisis de los factores involucrados en la ecuación del método MUSLE. Los factores C y P se pueden estimar con valor 1, el volumen de escorrentía (Q) y el factor de escurrimiento (q_p) se obtienen con los datos utilizados en el sistema de lluvia artificial y finalmente los factores topográficos L y S se pueden obtener mediante las ecuaciones 3 y 4 respectivamente, que entregan valores cercanos a los rangos mínimos. Una vez definido los factores mencionados se procedió a despejar K de la ecuación 2. En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de la erodabilidad K para cada una de las dosificaciones de biosólidos utilizadas en los lisímetros con sus respectivas repeticiones.

Tabla 4. Erodabilidad K para las distintas dosificaciones de Biosólido.

Dosificación	Repeticion N°	Y (ton)	Q (m ³)	q _p (m ³ /s)	L	S	C	P	K	K promedio
0% Biosólido	1	8,15E-04	0,0274	9,13E-05	0,161	5,019	1	1	0,117	0,150
	2	1,06E-03	0,0274	9,13E-05	0,161	5,019	1	1	0,152	
	3	1,25E-03	0,0274	9,13E-05	0,161	5,019	1	1	0,180	
12% Biosólido	1	4,35E-04	0,0274	9,13E-05	0,161	5,019	1	1	0,062	0,051
	2	3,32E-04	0,0274	9,13E-05	0,161	5,019	1	1	0,047	
	3	3,02E-04	0,0274	9,13E-05	0,161	5,019	1	1	0,043	
100% Biosólido	1	1,01E-04	0,0274	9,13E-05	0,161	5,019	1	1	0,014	0,019
	2	1,23E-04	0,0274	9,13E-05	0,161	5,019	1	1	0,017	
	3	1,74E-04	0,0274	9,13E-05	0,161	5,019	1	1	0,025	

De los valores de la erodabilidad K mostrados en la tabla 4, se le atribuye el máximo valor al suelo desnudo sin aplicación de biosólido y a medida que se aumenta la dosificación el factor K disminuye. Se demuestra con claridad que el parámetro K es preponderante al momento de pretender obtener de manera teórica el material erodado, es por esto que se concluye y/o demuestra de manera analítica que existe una relación directamente proporcional entre erodabilidad del suelo y el material erodado.

4.3 Contenido de Materia Orgánica

En las tabla 5 se presentan los contenidos de materia orgánica registrados en las distintas dosificaciones utilizadas en los ensayos de laboratorio y de terreno respectivamente, obtenidas de acuerdo a la norma ASTM-D4547 (1998). Se realizaron 6 ensayos por cada dosificación para así obtener un valor promedio, puesto que la mezcla no es homogénea. En el caso del ensayo de terreno con un 12% de dosificación se le realizo el ensayo a cada testigo, es decir, 12 repeticiones, debido a que la mezcla consideraba una mayor cantidad de material. Además en la figura 7 se muestran los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio en un gráfico de escala logarítmica.

Tabla 5. Porcentajes de materia orgánica para los ensayo de laboratorio y terreno

% de Dosificación	% MO en Ensayo de laboratorio			% MO en Ensayo de terreno		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
0	8,0	8,5	7,5	8,0	8,5	7,5
3	18,2	20,5	16,0	-	-	-
6	22,5	24,5	20,5	-	-	-
9	24,1	25,5	21,0	-	-	-
12	27,3	29,0	25,5	27,6	35,5	19,5
25	36,4	39,0	34,5	-	-	-
50	44,0	47,5	42,0	-	-	-
75	50,5	52,0	47,0	-	-	-
100	65,0	70,5	61,5	65,0	70,5	61,5

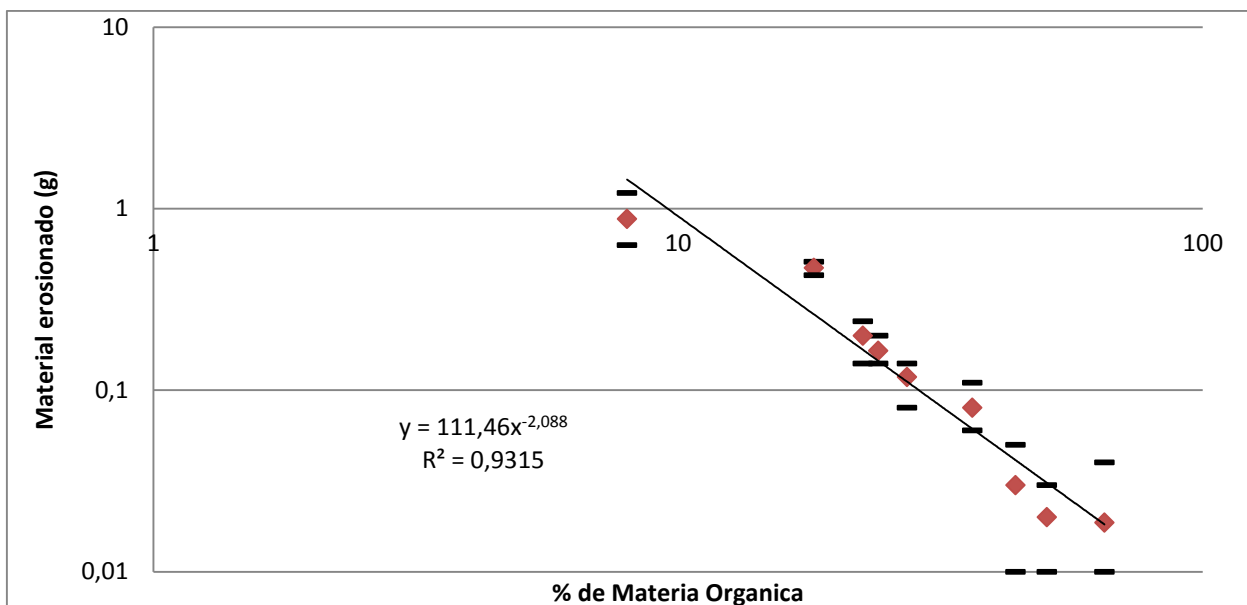


Figura 7. Promedios, máximos y mínimos de material erosionado según contenido de materia orgánica.

Como se observa en la tabla 6 el contenido de materia orgánica de biosólidos es mayor que el del suelo en estudio (aproximadamente 8 veces mayor). De esta manera, al aumentar la dosificación de estos incrementa considerablemente el porcentaje de materia orgánica en la mezcla.

Al asociar la tabla 6 con los resultados de pérdidas de material expuestos anteriormente, se puede decir, que el aumento del contenido de materia orgánica está directamente relacionado con la disminución del material desprendido en las probetas y a su vez en la erodabilidad, entregando una idea clara del por qué la inclusión de biosólidos al suelo modifica su erodabilidad. Esto es, la materia orgánica mantiene una estrecha relación con la cohesión del material. Finalmente, se puede decir que al aumentar el contenido de materia orgánica mediante la aplicación de lodos, aumenta la cohesión de las mezclas y en consecuencia su resistencia a la erosión.

Con respecto a la figura 7 se pudo obtener una línea de tendencia potencial con un $R^2 = 0,93$ lo que indica que la línea se ajusta bastante bien y que al contrario de la línea de tendencia obtenida en función de la dosificación de biosólido en la figura 5, esta no tiene ninguna restricción, lo que permite obtener resultados de material erosionado a partir de un 0% de biosólidos para este tipo de suelo.

4.4 Comparación con Método MUSLE

Para obtener la erodabilidad teórica se puede utilizar la ecuación 2, la cual está limitada a una materia orgánica menor al 12%, o bien a través del nomograma indicado en la figura 1 donde el contenido de materia orgánica está restringido al 4%. Dada estas limitaciones es que solo se obtuvo el factor K para el caso del suelo en su estado natural a través de la ecuación 2, dichos resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Obtención del Factor K de erodabilidad del suelo en estado natural

Contenido de MO	8 %
Rango de permeabilidad	4
(p)	
Estructura del suelo (s)	1
% arcilla	4,11
%arena muy fina + limo	76,87
%arcilla	0
M	7687
K	0,287

Al comparar el valor de erodabilidad obtenido en forma teórica y en el ensayo en terreno, entrega un Factor K mayor, la diferencia de los valores se debe principalmente a que la ecuación está diseñada para parcelas más grandes y exige un método de obtención de la materia orgánica distinto al utilizado, el cual en teoría debería arrojar valores menores al obtenido por el método de pérdida de masa, dado lo anterior es razonable que el resultado teórico sea mayor que el obtenido en terreno.

Es evidente la relación que existe entre el contenido de materia orgánica y la erodabilidad de un suelo, esto se le atribuye al aumento de la cohesión de la mezcla como mecanismo de defensa contra la erosión. Al inspeccionar del método MUSLE se respalda esta asociación, sin embargo, al ser aplicado se determinó que para los altos contenidos de materia orgánica manejados en esta experiencia, dicho método considera la materia orgánica constante y en consecuencia, este entregaría valores no representativos para las distintas mezclas estudiadas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El ensayo de laboratorio con el método de goteo aplicado en las distintas dosificaciones de biosólidos permitió desarrollar un análisis cualitativo de su erodabilidad, a través de la cuantificación de las pérdidas de material por concepto de erosión por goteo. Por otro lado, se puede concluir que no es posible medir de manera cuantitativa el valor de la erodabilidad debido a que las probetas son demasiado pequeñas, impidiendo de esta forma obtener el factor LS necesario para aplicar el modelo MUSLE.

Para el tipo de suelo utilizado, el cual fue clasificado como una arena limosa, al aplicar diferentes dosificaciones de biosólidos, las pérdidas de material erodado por goteo se redujeron considerablemente (entre un 47% y 97%), registrándose las variaciones más significativas en el rango del 0 a 12% de dosificación y en contenidos mayores al 25% se observa que la variación de la cantidad de material erodado empieza a disminuir. Además, se observa gráficamente que a partir del 50% no existen diferencias significativas en el comportamiento de las mezclas de lodo con respecto al material erodado.

Con respecto a los ensayos realizados en lisímetros de 25% de pendiente, se puede decir que estos validan los resultados obtenidos en los ensayos en laboratorio, ya que al aumentar la cantidad de biosólidos disminuye considerablemente el material erosionado. Utilizando este método, se logró cuantificar la erodabilidad aplicando la metodología MUSLE, la cual entregó que los valores del factor de erodabilidad K disminuyen conforme aumenta la dosificación de biosólido, ratificando la teoría de que a mayor incorporación de biosólidos disminuye la erodabilidad.

Se concluye además, que la modificación favorable de la erodabilidad del suelo registrada en este trabajo está directamente asociada al incremento de materia orgánica percibido, el cual es consecuencia de la inclusión de biosólidos. Sin embargo, también queda de manifiesto que MUSLE no es capaz de representar este hecho, debido a las limitaciones que impone su utilización en el aspecto de la materia orgánica.

En esta última observación se plantea la necesidad de desarrollar mejoras y modificaciones de la metodología USLE, debido a que no es posible ser utilizada para la aplicación de biosólidos al suelo, ya que estos aumentan considerablemente el contenido de materia orgánica de este.

Dada toda la información expuesta anteriormente se recomienda realizar estos ensayos para distintos tipos de suelos, ya que de esta manera se pueden encontrar relaciones entre la erosión obtenida en ensayos de laboratorio y la erodabilidad obtenida en los ensayos en terreno. Además, se podrían aumentar el número de dosificaciones y distintas pendientes para aquellos realizados en terreno y así tener un mejor rango de comparación.

Además se recomienda realizar un análisis comparativo de la obtención de materia orgánica a través del método de combustión húmeda (Walkley – Black) con el método de pérdida de masa en conformidad a la norma ASTM-D4547 (1998).

Por último, se recomienda mejorar la calidad de los materiales utilizados en los taludes a escala pertenecientes al LAGEMA, ya que como están expuestos a las condiciones climáticas de la región, estos se han ido deteriorando, lo que de igual manera ocurre con el sistema de lluvia artificial. Para ello se sugiere que sea de estructura metálica con la incorporación de rieles de manera que facilite el cambio de un lisímetro a otro, ya que actualmente necesita de más de una persona para su traslado, todo con la finalidad de obtener resultados más precisos.

REFERENCIAS

- ASTM D4547-98 “Standard Guide for Sampling Waste and Soils for Volatile Organic Compounds”, ASTM International.
- Antezana, J. (2001). “Calibración de los factores de erosión utilizando RUSLE en sistemas de producción agrícola en la Cuenca Taquiña”. Tesis Maestría Profesional, Levantamiento de Recursos Hídricos, Universidad Mayor de San Simón.
- Becker, M. (2006). “Métodos estadísticos aplicados”, Dirección de Bibliotecas, Universidad del Bío Bío.
- Castillo, M. (2009). “Influencia del método de inclusión de biosólidos secos sobre un suelo en el desarrollo vegetal y en la evapotranspiración del trébol”. Proyecto de Título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío Bío.
- Decreto 4 “Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamientos de aguas servidas”. Santiago, Chile. Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2009.
- Derpsch, R. (2004) “Entender el proceso de la erosión y la de infiltración de agua en el suelo” Publicación especial por No-till on the plains Inc. [en línea] <<http://www.rolf-derpsch.com/erosion-es.html>.> Acceso 08 de junio 2013.
- EPSTEIN, E. Ph.D. (2003). “Land application of seware sludge and biosolids. Editorial International Standard Book Number.Lewis Publishers”. United States of America. Pp 201.
- Grajales, Monsalve, Castaño (2006). “Programa de manejo integral de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la universidad tecnológica de Pereira” Scientia et technica Año XII, n° 31, Agosto 2006.

- Harris - Pierce.(1994) “The effects of biosolids application on native rangeland soils and vegetation”. M.S. thesis. Colorado State University Fort Collins.
- 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.
- Lambe, W. (1972). “Mecánica de suelos”. Editorial Limusa, México.
- Mancilla, G. (2008). “Uso de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE) en el campo forestal”. Apuntes Docentes, Departamento de Silvicultura, Universidad de Chile.
- Manzo, J. (2010). “Diseño de una experiencia para determinar la erodabilidad de un suelo”. Proyecto de Título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío Bío.
- NCh 1516 Of. 79. Mecánica de Suelos, “Determinación de la densidad en el terreno” Método del cono de arena. Santiago, Chile. Instituto Nacional de Normalización, 1979.
- NCh 1515 Of. 79. Mecánica de Suelos, “Determinación de humedad” Santiago, Chile. Instituto Nacional de Normalización, 1979.
- NCh 1517 Of. 79. Mecánica de Suelos, “Límite de Consistencia” Parte 1: Determinación del Límite Líquido, Santiago, Chile. Instituto Nacional de Normalización, 1979.
- NCh 1517 Of. 79. Mecánica de Suelos, “Límite de Consistencia” Parte 2: Determinación del Límite Plástico. Santiago, Chile. Instituto Nacional de Normalización, 1979.
- NCh 1534/2 of 1979. Mecánica de Suelos, “Relaciones humedad/densidad” Parte 2: Método de compactación con pisón de 4,5 kg y 460 mm de caída. Santiago, Chile. Instituto Nacional de Normalización, 1979.
- Rámila, Rojas (2008) “Alternativas de uso y disposición de biosólidos y su impacto en las tarifas de agua” Seminario de Título, Ingeniería Comercial, Universidad de Chile.

- Riquelme, C. (2010). “Diseño de lisímetros para estudiar la erosión hídrica en taludes a escalas”. Proyecto de título Ingeniería Civil .Universidad del Bío Bío
- Vélez, J. (2007) “Los biosólidos: ¿Una solución o un problema?”, Artículo académico, Universidad Nacional de Colombia.
- Wischmeier W., Smith D. (1978). Predicting rainfall erosion. United States Department of Agricultura, Agricultura Handbook n° 537.

ANEXOS

ANEXO A: ANTECEDENTES GENERALES

Erosión

La erosión del suelo es la remoción del material superficial por acción del viento o del agua. El proceso se presenta gracias a la presencia del agua en las formas: pluvial (lluvias) o de escorrentía (escurrimiento), en las primeras con impacto y las segundas con fuerzas tractivas, que en contacto con el suelo vencen la resistencia de las partículas (Fricción o cohesión) del suelo generándose el proceso de erosión.

Muchos proyectos de ingeniería exigen la remoción de la vegetación y excavaciones de suelo generando problemas ambientales en laderas y cursos de agua por la producción e incorporación de sedimentos a las corrientes que alteran los ecosistemas naturales y generan gran cantidad de problemas por sedimentación.

La erosión es la forma más completa de degradación del suelo y la más común en Chile. 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).

Según el agente causante, la erosión se puede clasificar en dos tipos:

- **Erosión eólica:** Causada por la acción del Viento.
- **Erosión hídrica:** Causada por la acción del agua, siendo la forma más relevante y perjudicial de la erosión (único factor climático presente en ésta investigación).

Erosión hídrica

Es la erosión por agua lluvia y abarca la erosión provocada por el impacto de las gotas sobre el suelo desnudo, como también la acción hidráulica que arranca y transporta las partículas de suelo por el escurrimiento en laderas y taludes.

La erosión hídrica es una de las formas más importantes de degradación de suelos y es causada por la energía cinética de las gotas de lluvia, al impactar una superficie de terreno desnudo o no debidamente protegido por la vegetación. Esta acción separa las partículas de los agregados del suelo, las que posteriormente son arrastradas por el escurrimiento superficial de las aguas. (Rodríguez, 2005).

El proceso de la erosión comienza con una gota que parece inofensiva, al llover las gotas de agua golpean el suelo y con la continua caída de estas, se humedece el suelo y sus partículas son desprendidas. Cuando la gota de agua golpea el suelo, ocasiona que se desprendan partículas y al mismo tiempo, sean arrastradas hacia las partes mas bajas.

Erosión por salpicadura

Es la causa más importante de la segregación de las partículas superficiales de suelo, se produce como consecuencia del impacto directo de las gotas de lluvia sobre el terreno. Representa la forma más básica de transporte de los agregados y a través de la cual se da origen a elementos vulnerables a ser arrastrados posteriormente.

Erosión laminar

Es una erosión superficial, en donde después de una lluvia es posible que se pierda una capa fina y uniforme de toda la superficie del suelo como si fuera una lámina. Es la forma más peligrosa de erosión hídrica ya que esta pérdida, al principio casi imperceptible y sólo será visible cuando pasado un tiempo haya aumentado su intensidad.

Tiene lugar cuando la intensidad de la precipitación excede la infiltración o bien cuando el suelo se satura de agua, lo que da lugar a un exceso de agua en la superficie.

La escorrentía superficial transporta las partículas más finas y provoca una disminución de la productividad del suelo (pérdida de arcilla, materia orgánica y nutriente). El encrostramiento superficial favorece la escorrentía superficial. Este proceso da origen a la erosión en surcos y posteriormente en cárcavas.

La erosión por lámina de agua depende de varios factores naturales, como la rugosidad, permeabilidad, estructura del suelo, entre otras características físicas. Además, depende de las

características ligadas a la morfología del suelo (pendiente del terreno) y características ligadas al clima (régimen de precipitaciones y tormentas) (Manzo, 2010).

Erosión en surcos

La erosión en surcos, ocurre a medida que el agua de escurrimiento superficial baja por la pendiente va concentrándose cada vez más en las micro depresiones del terreno, formando pequeños cauces o canales de evacuación de agua. La velocidad que alcanza el agua de escurrimiento en estos pequeños canales, permite la profundización y arrastre del material y la formación de los surcos de erosión.

En esta etapa, el ancho y profundidad de los surcos es pequeña, pero aguas abajo estos aumentan sus dimensiones y convergen a canales de mayor importancia denominados cárcavas (Manzo, 2010).

Erosión en cárcavas

Este tipo de erosión surge generalmente luego de la erosión laminar y la erosión en surcos. Las cárcavas son canales mucho más amplios y profundos que los surcos de erosión formados por el agua de escurrimiento. El agua de lluvia que se concentra en los surcos de cultivo, huellas de los tractores, surcos de erosión, sendas de los animales etc., se va acumulando cada vez más en el tiempo. Estas cárcavas se diferencian de los surcos de erosión, por sus mayores dimensiones.

La formación de las cárcavas, así como sus dimensiones, dependen de varios factores, entre los cuales podemos mencionar las características del suelo, la pendiente, el caudal de escorrentía y su velocidad.

En cuanto al ancho, la profundidad y la longitud de las cárcavas aumentan paulatinamente con el tiempo, debido a la conjunción de procesos tales como: roce del agua y materiales desprendidos y arrastrados en el fondo y desmoronamiento de las paredes de los taludes.

Variables que influyen en la erosión

La erosión hídrica es ocasionada por la interacción de cuatro factores (clima, suelo, cubierta y pendiente) que se conjugan para crear un entorno que puede ser más o menos favorable, dando origen a zonas de alta, media o baja tasa de erosión. Además se suman agentes como la cobertura del terreno y la pendiente, los que se describen con mayor detalle a continuación.

Erosividad

Es la capacidad potencial del clima de provocar erosión (lluvia, en este caso). Es en función de las características físicas de las precipitaciones: intensidad, duración y época (Manzo, 2010).

Precipitaciones de baja intensidad poseen un bajo poder erosivo, ya que la velocidad de la gota de agua es menor a la de precipitaciones con una intensidad mayor. Además la escorrentía superficial se ve influenciada de manera similar.

En la Región del Biobío ocurren específicamente en invierno, dos tipos de precipitaciones; una intensa de poca duración, pero de gran poder erosivo y otra menos intensa pero con una mayor duración, resultando su erosión no tan severa como la primera en términos inmediatos, pero similar a largo plazo.

Erodabilidad

La erodabilidad es la vulnerabilidad o susceptibilidad intrínseca del suelo a sufrir erosión, considerando el efecto integrado asociado a lluvia, escurrimiento e infiltración. Es en función de la estructura y tamaño de las partículas, contenido de materia orgánica y permeabilidad del suelo.

Los suelos tienden a ser menos erodables con una reducción en la fracción de limo a pesar del correspondiente aumento en la fracción de arcilla o arena. Esto se debe a que la arcilla presenta resistencia al desprendimiento en base a cohesión, mientras que la arena, si bien es vulnerable al desprendimiento, posee tasas de infiltración altas lo que se traduce en volúmenes de escorrentía superficial pequeños.

En nuestra región, se encuentran suelos muy susceptibles a la erosión, consecuencia de las grandes cantidades de limos que componen su superficie, los cuales no poseen cohesión y presentan bajas tasas de infiltración.

Cobertura

La pérdida potencial de suelo por efecto del agua aumenta abruptamente cuando la cobertura del terreno cae bajo el 70%. Así suelos desnudos y labrados particularmente se exponen a tasas de erosión elevadas (Manzo, 2010).

Toda cubierta superficial de suelo, sea de origen orgánico o inorgánico, tiene un efecto protector y favorece las condiciones para el desarrollo vegetal, en mayor o menor medida. Así, podemos encontrar biomantos, geosintéticos y, por supuesto, cobertura vegetal.

Pendiente

La pendiente del terreno posee directa relación con la vulnerabilidad a la erosión hídrica, esto es, a mayor pendiente mayores tasas de erosión.

Esto se evidencia en un terreno llano, donde el desprendimiento se produce de manera aleatoria compensando sus propias pérdidas superficiales, mientras que en horizontes inclinados el arrastre se produce pendiente abajo y la velocidad de escurrimiento juega un papel fundamental, puesto que es directamente proporcional a la pendiente. A esto se suma que en terrenos escarpados el desarrollo de especies vegetales se torna más complicado y en pendientes muy pronunciadas es escaso o nulo.

ANEXO B: METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS

B.1 Metodología del ensayo de laboratorio

Para la correcta ejecución de los ensayos se adopta la metodología propuesta por Manzo (2010), presentada a continuación.

- Introducir la muestra de suelo en la probeta. Éste proceso se realiza en dos capas, proporcionándole tres golpes con el pisón a cada una de ellas.
- Quitar excedentes de suelo en la probeta. Para ello se pasa una regla para enraizar la parte superior del recipiente, de tal forma que el suelo quede a ras de la probeta. Luego, con una brocha limpiar el perímetro y bordes superiores, de este modo la probeta queda como se muestra en la figura 3.6 (ver anexo)
- Pesar la probeta vacía, este dato será necesario para determinar la densidad del material.
- Introducir la probeta dentro del recipiente que capta el material desprendido. La ubicación de la probeta debe ser tal que las gotas de agua impacten en el centro de ella.
- Vaciar 15 cm³ de agua al sistema de goteo. La distancia entre la punta de la aguja y la superficie de la probeta deben ser 50 cm. Luego esperar a que termine de caer toda el agua, en la figura 3.7 se muestra una vez terminado el goteo. (anexo)
- Quitar el material desprendido de los bordes de la probeta. Para ello se lava la probeta sobre el recipiente que contiene el material desprendido con pequeñas cantidades de agua.
- Vaciar el material desprendido a un recipiente que se pueda introducir al horno. Se deben quitar los restos del recipiente con cantidades pequeñas de agua.
- Dejar que el material decante durante diez minutos y quitar el excedente de agua vertiéndola a otro recipiente procurando que en este proceso no se traspasen partículas de suelo como se muestra en la figura 3.8.
- Ingresar el recipiente con material desprendido al horno durante un día a 60° C.
- Pesar el recipiente con material desprendido seco.

B.2 Metodología propuesta para realizar los ensayos en terreno:

Para la correcta ejecución de los ensayos en terreno se adopta la metodología propuesta por Riquelme (2011).

- Quitar una capa de 3 cm de suelo de tal manera que la superficie quede pareja y lista para ser rellenada.
- Pesar el material a utilizar para rellenar y luego incorporarlo en dos capas.
- Cada capa se compacta con un pisón de la siguiente maneta: El pisón se levanta 30 cm y se deja caer libremente, esta acción se realiza 15 veces sobre el mismo lugar y se repite en toda la superficie hasta cubrirla completamente, finalmente se repite el mismo procedimiento para la segunda capa pero cambiado el número de golpes aplicados a 10 golpes.
- Luego se aplica el ensayo de densidades no invasivo propuesto por Hernández (2010). Éste consiste en retirar testigos de los lisímetros mediante probetas de PVC con un diámetro interior de 22mm, las cuales son introducidas en cuatro puntos representativos. Estas probetas deben introducirse haciendo un doble giro en 360°, para evitar agregar presión, hasta llegar a una profundidad de 25mm. Las probetas insertadas se muestran en la figura B.1.



Figura B.1 Distribución de probetas o testigos (Fuente: Elaboración propia)

- Posteriormente se retiran las probetas y el contenido de suelo en su interior el colocado en una capsula las cuales son pesadas y luego introducidas en un horno a 60°C donde se dejan secar por un día y luego volver a pesar, de esta manera se puede obtener la densidad seca de los ensayos. Figura 3.18 muestra las probetas dentro de las capsulas antes de retirar su contenido.
- Medir la humedad inicial del suelo, para ello se extrae una muestra aleatoria del suelo se pesa para obtener su peso húmedo y posterior la que es sometido a un proceso de secado por un día a 60°C y volver a pesar.
- Montar el sistema de recolección de material erodado y conectarlo al bidón, luego montar el sistema de lluvia artificial y colocarlo sobre el lisímetro a ensayar. Finalmente se da el agua hasta llegar a una presión de 0,5 bar y mantenerlo así por 5 minutos.
- Una vez terminado el ensayo se debe retirar la canaleta con el material erodado en ella junto con el bidón que posee la mezcla suelo – agua.
- Medir el volumen de mezcla que hay en el bidón, el cual se encuentra debidamente graduado, luego se extrae una muestra de 500 ml de la mezcla para se llevada al laboratorio. Para el caso del material erosionado sobre la canal este es colocado en una paila o algún recipiente que pueda ser introducido en un horno.
- Una vez en el laboratorio el material se procede a depositar 50 ml, de la muestra de la mezcla del bidón, en una bandeja para luego someterla a un proceso de secado a 60°C durante un día junto con el material que se encontraba en la canal.
- Finalmente se extrae en el material seco y es pesado. De este modo se puede obtener el material erodado de cada lisímetro.

B.3 Metodología para la determinación de materia orgánica.

Este ensayo consiste en volatilización de la materia orgánica, así, una vez culminado el ensayo, la muestra que queda en el recipiente corresponde al contenido mineral, mientras que la porción oxidada por combustión, asociada al contenido orgánico, entonces esta puede ser determinada por diferencia de masa.

Procedimiento del ensayo.

- Secar las muestra en horno a 70°C durante 24 horas
- Pesar el crisol de porcelana.
- Una vez seco, pesar 2 gramos de material y depositarlo en un crisol.
- Introducir el crisol de porcelana en la mufla.
- Accionar la mufla y esperar que alcance 550°C.
- Alcanzada la temperatura se debe esperar 20 minutos.
- Extraer el crisol pesarlo en la balanza.
- El contenido de materia orgánica se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$MO(\%) = \frac{P_m - P_c}{P_m - P} * 100$$

Donde,

P_m : Peso del crisol más muestra [gr]

P_c : Peso del crisol más ceniza [gr]

P : Peso del crisol [gr]

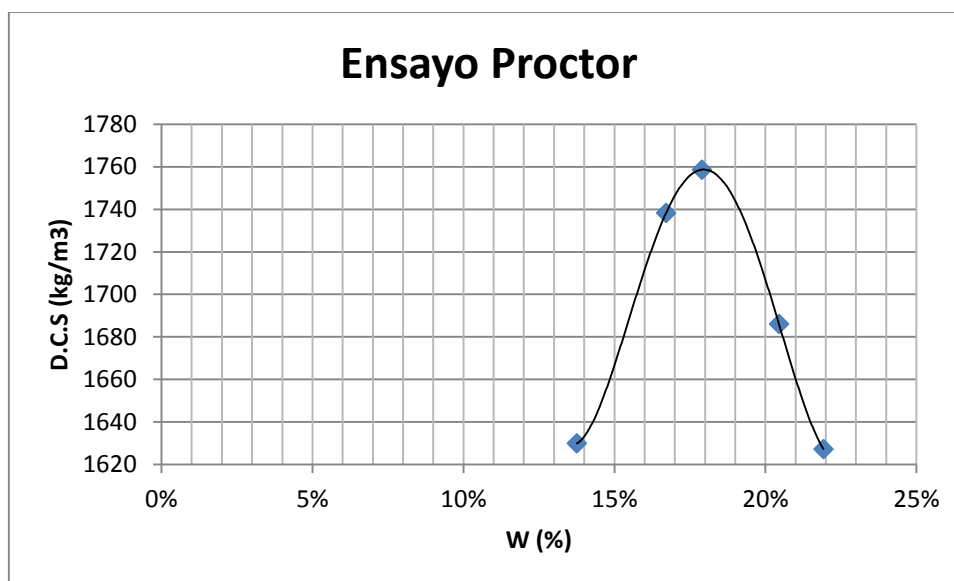
Este valor representa el contenido de materia orgánica respecto de la masa total de material seco.

ANEXO C: CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Ensayo Proctor Modificado

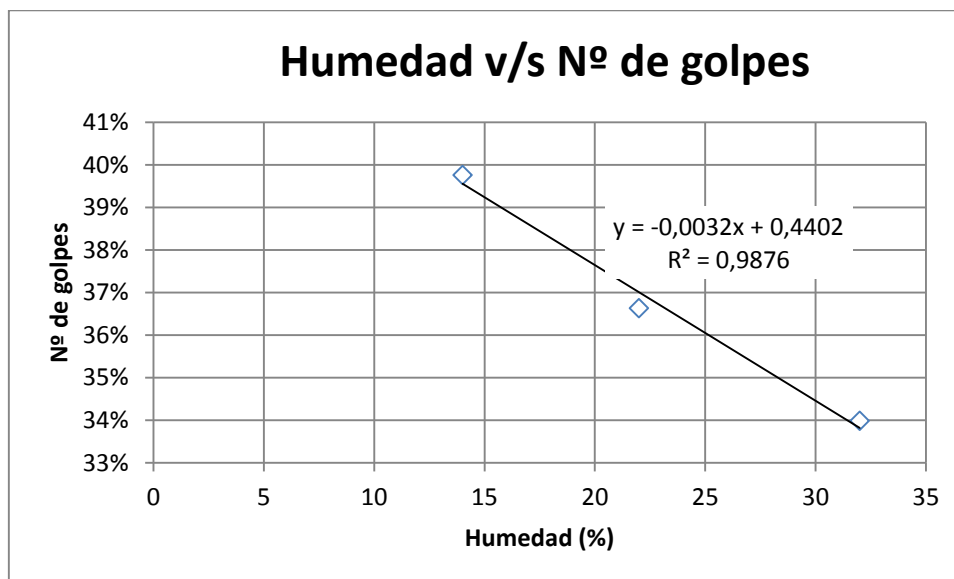
Masa molde + material (g)	Masa Molde (g)	Masa Material Solo (g)	Volumen Molde (cm ³)	D.C.H (gr/cm ³)	Humedad real (%)	D.C.S (kg/m ³)
3520	1609	1911	942	2029	16,71%	1738
3688	1739	1949	940	2073	17,90%	1759
3648	1739	1909	940	2031	20,45%	1686
3482	1739	1743	940	1854	13,76%	1630
3604	1739	1865	940	1984	21,93%	1627

Humedad (%)	D.C.S (kg/m ³)
13.76	1630
16.71	1738
17.90	1759
20.45	1686
21.93	1627
D.M.C.S	1759 kg/m ³



Límite líquido

Cápsula N°	25	59	24
Masa cápsula	18,66	18,2	14,52
Masa cáp.+s. seco (g)	26,31	27,48	23,8
Humedad	33,99%	36,64%	39,76%
Masa cáp.+s. húmedo (g)	28,91	22	14
N° Golpes	32	22	14



Límite plástico

Este tipo de suelo no presenta límite de plástico, por lo tanto se caracteriza como suelo N.P.

Granulometría

Peso Muestra: 304,43 (g)

Tamiz	Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	% retenido	% que pasa
3	80	0	0	100
2	50	0	0	100
1 1/2	40	0	0	100
1	25	0	0	100
3/4	20	0	0	100
3/8	10	0	0	100
4	5	2,49	0,81	99,19
10	2	16,94	5,56	93,63
20	0,8	14,93	4,9	88,73
40	0,5	15,04	4,94	83,79
60	0,25	23,5	7,72	76,87
200	0,08	106,8	35	41,07

Límites de Atterberg:
 L.L = 36%
 L.P = N.P
 I.P = N.P

Clasificación:
 USCS: SM
 ASSHTO: A-4 (0)

ANEXO D: REGISTRO DE MATERIAL EROSIONADO

A continuación se muestran las tablas desarrolladas para determinar la cantidad de material erosionado que se obtuvieron de los ensayos en laboratorio con probetas no drenadas y los ensayos en terreno con lisímetros de un 25% de pendiente

D.1 Registro de material erosionado de las distintas mezclas en probetas no drenadas

D1.1 Suelo con 0% de biosólido

Repetición (N°)	Masa Probeta (g)	Masa prob. + material (g)	Masa material (g)	Densidad (Kg/m3)	Masa Bandeja (g)	Masa Bandeja + Material (g)	Masa material desprendido (g)
1	47,49	60,73	13,24	1529	2,7	3,92	1,22
2	47,49	60,45	12,96	1497	2,69	3,67	0,98
3	47,49	60,55	13,06	1508	2,69	3,7	1,01
4	47,49	59,43	11,94	1379	2,69	3,32	0,63
5	47,49	59,61	12,12	1400	2,68	3,47	0,79
6	47,49	59,72	12,23	1412	2,67	3,51	0,84
7	47,49	59,81	12,32	1423	2,7	3,55	0,85
8	47,49	59,9	12,41	1433	2,69	3,6	0,91
9	47,49	59,88	12,39	1431	2,66	3,52	0,86
10	47,49	59,93	12,44	1437	2,7	3,65	0,95
11	47,49	59,63	12,14	1402	2,7	3,52	0,82
12	47,49	59,85	12,36	1427	2,69	3,58	0,89
13	47,49	59,44	11,95	1380	2,69	3,45	0,76
14	47,49	60,01	12,52	1446	2,69	3,68	0,99
15	47,49	59,49	12	1386	2,68	3,51	0,83
16	47,49	59,52	12,03	1389	2,67	3,53	0,86
17	47,49	59,62	12,13	1401	2,7	3,53	0,83
18	47,49	59,9	12,41	1433	2,69	3,65	0,96
19	47,49	59,53	12,04	1390	2,66	3,55	0,89
20	47,49	59,54	12,05	1392	2,7	3,58	0,88
21	47,49	59,61	12,12	1400	2,7	3,61	0,91
22	47,49	59,58	12,09	1396	2,69	3,57	0,88
23	47,49	59,63	12,14	1402	2,69	3,61	0,92
24	47,49	59,55	12,06	1393	2,69	3,53	0,84
25	47,49	59,42	11,93	1378	2,68	3,43	0,75

26	47,49	60,03	12,54	1448	2,67	3,66	0,99
27	47,49	59,61	12,12	1400	2,7	3,52	0,82
28	47,49	59,59	12,1	1397	2,69	3,49	0,8
29	47,49	59,65	12,16	1404	2,66	3,54	0,88
30	47,49	59,63	12,14	1402	2,7	3,55	0,85
Promedio							0,88
Desv. Est.							0,10

D1.2 Mezcla de suelo con 3% de biosólido

Repetición N°	Masa Probeta (g)	Masa prob. + material (g)	Masa material (g)	Densidad (Kg/m3)	Masa Bandeja (g)	Masa Bandeja + Material (gr)	Masa material desprendido (g)
1	47,49	59,82	12,33	1424	2,67	3,1	0,43
2	47,49	58,8	11,31	1306	2,65	3,16	0,51
3	47,49	58,85	11,36	1312	2,68	3,15	0,47
4	47,49	59,77	12,28	1418	2,68	3,13	0,45
5	47,49	58,78	11,29	1304	2,69	3,18	0,49
6	47,49	58,82	11,33	1308	2,69	3,17	0,48
Promedio							0,47
Desv. Est.							0,03

D1.3 Mezcla de suelo con 6% de biosólido

Repetición N°	Masa Probeta (g)	Masa prob. + material (g)	Masa material (g)	Densidad (Kg/m3)	Masa Bandeja (g)	Masa Bandeja + Material (gr)	Masa material desprendido (g)
1	51,97	63,84	11,87	1371	2,67	2,89	0,22
2	51,97	64,32	12,35	1426	2,65	2,79	0,14
3	51,97	63,48	11,51	1329	2,69	2,93	0,24
4	51,97	63,42	11,45	1322	2,69	2,91	0,22
5	51,97	63,45	11,48	1326	2,7	2,88	0,18
6	51,97	63,39	11,42	1319	2,67	2,87	0,2
Promedio							0,2
Desv. Est.							0,035

D1.4 Mezcla de suelo con 9% de biosólido

Repetición N°	Masa Probeta (g)	Masa prob. + material (g)	Masa material (g)	Densidad (Kg/m3)	Masa Bandeja (g)	Masa Bandeja + Material (gr)	Masa material desprendido (g)
1	49,43	61,02	11,59	1338	2,63	2,79	0,16
2	49,43	60,95	11,52	1330	2,67	2,84	0,17
3	49,43	61,1	11,67	1348	2,67	2,81	0,14
4	49,43	60,98	11,55	1334	2,67	2,81	0,14
5	49,43	61,19	11,76	1358	2,69	2,89	0,2
6	49,43	61,3	11,87	1371	2,69	2,87	0,18
Promedio							0,165
Desv. Est.							0,023

D1.5 Mezcla de suelo con 12% de biosólido

Repetición N°	Masa Probeta (g)	Masa prob. + material (g)	Masa material (g)	Densidad (Kg/m3)	Masa Bandeja (g)	Masa Bandeja + Material (gr)	Masa material desprendido (g)
1	48,08	59,61	11,53	1332	2,68	2,81	0,13
2	48,08	59,48	11,4	1317	2,68	2,76	0,08
3	48,08	59,39	11,31	1306	2,69	2,8	0,11
4	48,08	59,9	11,82	1365	2,7	2,84	0,14
5	48,08	58,95	10,87	1255	2,67	2,8	0,13
6	48,08	59,12	11,04	1275	2,69	2,81	0,12
Promedio							0,118
Desv. Est.							0,021

D1.6 Mezcla de suelo con 25% de biosólido

Repetición N°	Masa Probeta (g)	Masa prob. + material (g)	Masa material (g)	Densidad (Kg/m3)	Masa Bandeja (g)	Masa Bandeja + Material (gr)	Masa material desprendido (g)
1	49,78	59,71	9,93	1147	2,69	2,78	0,09
2	49,78	59,63	9,85	1138	2,67	2,75	0,08
3	49,78	58,98	9,2	1062	2,67	2,74	0,07
4	49,78	60,03	10,25	1184	2,68	2,75	0,07
5	49,78	59,5	9,72	1123	2,69	2,8	0,11
6	49,78	59,73	9,95	1149	2,7	2,76	0,06
						Promedio	0,08
						Desv. Est.	0,017

D1.7 Mezcla de suelo con 50% de biosólido

Repetición (N°)	Masa Probeta (g)	Masa prob. + material (g)	Masa material (g)	Densidad (Kg/m3)	Masa Bandeja (g)	Masa Bandeja + Material (g)	Masa material desprendido (g)
1	49,43	58,8	9,37	1082	2,65	2,67	0,02
2	49,43	57,8	8,37	967	2,7	2,74	0,04
3	49,43	57,95	8,52	984	2,69	2,72	0,03
4	49,43	58,37	8,94	1032	2,69	2,7	0,01
5	49,43	58,72	9,29	1073	2,67	2,69	0,02
6	49,43	58,13	8,7	1005	2,68	2,7	0,02
7	49,43	59,12	9,69	1119	2,68	2,72	0,04
8	49,43	58,44	9,01	1041	2,67	2,69	0,02
9	49,43	58,32	8,89	1027	2,69	2,71	0,02
10	49,43	58,09	8,66	1000	2,68	2,71	0,03
11	49,43	58,39	8,96	1035	2,65	2,68	0,03
12	49,43	57,91	8,48	979	2,7	2,74	0,04
13	49,43	59,02	9,59	1108	2,69	2,72	0,03
14	49,43	58,05	8,62	995	2,69	2,73	0,04
15	49,43	58,13	8,7	1005	2,67	2,7	0,03
16	49,43	58,88	9,45	1091	2,68	2,71	0,03
17	49,43	59,45	10,02	1157	2,68	2,72	0,04
18	49,43	58,55	9,12	1053	2,67	2,7	0,03
19	49,43	57,75	8,32	961	2,69	2,71	0,02

20	49,43	57,87	8,44	975	2,68	2,69	0,01
21	49,43	58,42	8,99	1038	2,65	2,67	0,02
22	49,43	58,77	9,34	1079	2,7	2,72	0,02
23	49,43	58,91	9,48	1095	2,69	2,73	0,04
24	49,43	58,79	9,36	1081	2,69	2,72	0,03
25	49,43	59,22	9,79	1131	2,67	2,72	0,05
26	49,43	58,98	9,55	1103	2,68	2,71	0,03
27	49,43	59,45	10,02	1157	2,68	2,73	0,05
28	49,43	59,19	9,76	1127	2,67	2,7	0,03
29	49,43	58,86	9,43	1089	2,69	2,73	0,04
30	49,43	58,76	9,33	1077	2,68	2,72	0,04
Promedio							0,03
Desv. Est.							0,010

D1.8 Mezcla de suelo con 75% de biosólido

Repetición N°	Masa Probeta (g)	Masa prob. + material (g)	Masa material (g)	Densidad (Kg/m3)	Masa Bandeja (g)	Masa Bandeja + Material (gr)	Masa material desprendido (g)
1	48,08	56,97	8,89	1027	2,68	2,69	0,01
2	48,08	56,9	8,82	1019	2,68	2,69	0,01
3	48,08	57,11	9,03	1043	2,7	2,72	0,02
4	48,08	56,01	7,93	916	2,69	2,72	0,03
5	48,08	56,91	8,83	1020	2,67	2,69	0,02
6	48,08	56,55	8,47	978	2,69	2,72	0,03
Promedio							0,02
Desv. Est.							0,008

D1.9 100% de biosólido

Repetición (N°)	Masa Probeta (g)	Masa prob. + material (g)	Masa material (g)	Densidad (Kg/m3)	Masa Bandeja (g)	Masa Bandeja + Material (g)	Masa material desprendido (g)
1	49,78	57,82	8,04	929	2,69	2,7	0,01
2	49,78	57,23	7,45	860	2,68	2,69	0,01
3	49,78	57,02	7,24	836	2,68	2,71	0,03
4	49,78	58,12	8,34	963	2,64	2,66	0,02

5	49,78	58,05	8,27	955	2,7	2,72	0,02	
6	49,78	57,93	8,15	941	2,69	2,7	0,01	
7	49,78	57,77	7,99	923	2,65	2,67	0,02	
8	49,78	58,23	8,45	976	2,67	2,68	0,01	
9	49,78	58,67	8,89	1027	2,67	2,71	0,04	
10	49,78	58,98	9,2	1062	2,68	2,71	0,03	
11	49,78	58,6	8,82	1019	2,69	2,71	0,02	
12	49,78	58,55	8,77	1013	2,68	2,7	0,02	
13	49,78	58,51	8,73	1008	2,68	2,71	0,03	
14	49,78	58,72	8,94	1032	2,64	2,66	0,02	
15	49,78	57,2	7,42	857	2,7	2,71	0,01	
16	49,78	58,09	8,31	960	2,69	2,71	0,02	
17	49,78	57,82	8,04	929	2,65	2,66	0,01	
18	49,78	57,49	7,71	890	2,67	2,68	0,01	
19	49,78	57,59	7,81	902	2,67	2,69	0,02	
20	49,78	56,9	7,12	822	2,68	2,7	0,02	
21	49,78	57,09	7,31	844	2,69	2,72	0,03	
22	49,78	57,89	8,11	937	2,68	2,71	0,03	
23	49,78	58,1	8,32	961	2,68	2,69	0,01	
24	49,78	56,76	6,98	806	2,64	2,66	0,02	
25	49,78	57,34	7,56	873	2,7	2,71	0,01	
26	49,78	56,79	7,01	810	2,69	2,7	0,01	
27	49,78	58,11	8,33	962	2,65	2,67	0,02	
28	49,78	57,68	7,9	912	2,67	2,69	0,02	
29	49,78	57,82	8,04	929	2,67	2,69	0,02	
30	49,78	58,05	8,27	955	2,68	2,69	0,01	
							Promedio	0,018
							Desv. Est.	0,008

D.2 Registro de material erosionado los ensayos en terreno con lisímetros de un 25% de pendiente.

D.2.1 Lisímetro con 0% de Biosólido

Testigos

Repetición N°	Testigo	Peso bandeja (g)	Peso Bandeja + Suelo húmedo (g)	Peso bandeja + suelo seco (g)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	Densidad húmeda (Kg/m ³)	% de Humedad
1	1-A	26,2	38,8	36,2	12,6	10	1455	26
	1-B	24,2	34,9	32,7	10,7	8,5	1236	26
	1-C	26,9	38,8	36,4	11,9	9,5	1374	25
	1-D	24,4	36,5	34	12,1	9,6	1397	26
2	2-A	24,3	39,5	36,6	15,2	12,3	1755	24
	2-B	27,8	42,1	39,3	14,3	11,5	1651	24
	2-C	26,8	39,8	37,3	13	10,5	1501	24
	2-D	27,2	38,8	36,4	11,6	9,2	1340	26
3	3-A	26,8	38,3	36	11,5	9,2	1328	25
	3-B	25,1	38,7	35,7	13,6	10,6	1571	28
	3-C	25,5	37,3	34,8	11,8	9,3	1363	27
	3-D	27	37,8	35,6	10,8	8,6	1247	26

Material erosionado en canaleta

Repetición	Peso bandeja	Peso bandeja + Suelo Seco	Material erosionado
N°	(g)	(g)	(g)
1	8,5	645,9	637,4
2	8,5	785,1	776,6
3	8,5	972,6	964,1
		promedio	792,7

Material erosionado en bidón muestra de 50 ml

Repetición	Peso bandeja	Peso bandeja + Suelo Seco	Peso suelo seco	Volumen en bidón	Concentración	Material erosionado en bidón
N°	(g)	(g)	(g)	(l)	(g/l)	(g)
1	2,7	3,7	1	8,9	20	178
2	2,6	4	1,4	10,05	28	281,4
3	2,7	3,8	1,1	13,2	22	290,4
					Promedio	249,9

Material total erosionado

Repetición	Material erosionado	Promedio
N°	(g)	(g)
1	815,4	
2	1058	1042,6
3	1254,5	

D.2.2 Lisímetro con mezcla de 12% de Biosólido

Testigos

Repetición N°	Testigo	Peso bandeja (g)	Peso Bandeja + Suelo húmedo (g)	Peso bandeja + suelo seco (g)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	Densidad húmeda (Kg/m ³)	% de Humedad
1	1-A	2,7	12,9	8,5	10,2	5,8	1178	76
	1-B	2,6	14,1	9,2	11,5	6,6	1328	74
	1-C	2,6	13,9	9,1	11,3	6,5	1305	74
	1-D	2,6	13,5	8,4	10,9	5,8	1259	88
2	2-A	2,6	15,4	10,1	12,8	7,5	1478	71
	2-B	2,7	14	8,5	11,3	5,8	1305	95
	2-C	2,7	13,9	8,3	11,2	5,6	1293	100
	2-D	2,7	15	9,5	12,3	6,8	1420	81
3	3-A	2,6	13,2	8,1	10,6	5,5	1224	93
	3-B	2,7	14,4	9,8	11,7	7,1	1351	65
	3-C	2,7	14,1	9,2	11,4	6,5	1317	75
	3-D	2,7	15,4	10,4	12,7	7,7	1467	65

Contenido de materia orgánica de la mezcla

Repetición N°	Testigo	Peso crisol (g)	Peso crisol + muestra seca (g)	Peso crisol + ceniza (g)	MO (%)	Promedio MO (%)
1	1-A	20,79	22,79	22,25	27	30,625
	1-B	21,24	23,24	22,68	28	
	1-C	24,83	26,83	26,19	32	
	1-D	19,97	21,97	21,26	35,5	
2	2-A	24,83	26,83	26,23	30	28,25
	2-B	19,97	21,97	21,32	32,5	
	2-C	21,24	23,24	22,77	23,5	
	2-D	20,79	22,79	22,25	27	
3	3-A	20,79	22,79	22,31	24	24
	3-B	21,24	23,24	22,85	19,5	
	3-C	24,83	26,83	26,29	27	
	3-D	19,97	21,97	21,46	25,5	

Material erosionado en canaleta

Repetición N°	Peso bandeja (g)	Peso bandeja + Suelo Seco (g)	Material erosionado (g)
1	13,1	284,7	271,6
2	13,3	263,1	249,8
3	13,3	223,5	210,2
promedio			243,9

Material erosionado en bidón muestra de 50 ml

Repetición N°	Peso bandeja (g)	Peso bandeja + Suelo Seco (g)	Peso suelo seco (g)	Volumen en bidón (l)	Concentración (g/l)	Material erosionado en bidón (g)
1	2,6	3,2	0,6	13,6	12	163,2
2	2,7	3,1	0,4	10,3	8	82,4
3	2,6	2,9	0,3	15,3	6	91,8
Promedio						112,5

Material total erosionado

Repetición N°	Material erosionado (g)	Promedio (g)
1	434,8	356,3
2	332,2	
3	302	

D.2.2 Lisímetro con 100% de Biosólido

Testigos

Repetición N°	Testigo	Peso bandeja (g)	Peso Bandeja + Suelo húmedo (g)	Peso bandeja + suelo seco (g)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	Densidad húmeda (Kg/m ³)	% de Humedad
1	1-A	2,7	11,4	5,2	8,7	2,5	1005	248
	1-B	2,6	11,9	5,5	9,3	2,9	1074	221
	1-C	2,6	13	5,9	10,4	3,3	1201	215
	1-D	2,6	12,2	5,6	9,6	3	1109	220
2	2-A	2,6	10,1	4,9	7,5	2,3	866	226
	2-B	2,7	10,5	5,1	7,8	2,4	901	225
	2-C	2,6	8,7	4,6	6,1	2	704	205
	2-D	2,7	10,6	4,9	7,9	2,2	912	259
3	3-A	2,6	13	5,9	10,4	3,3	1201	215
	3-B	2,7	15,2	6,8	12,5	4,1	1444	205
	3-C	2,7	10,4	5,2	7,7	2,5	889	208
	3-D	2,7	11,7	5,3	9	2,6	1039	246

Material erosionado en canaleta

Repetición	Peso bandeja	Peso bandeja + Suelo Seco	Material erosionado
N°	(g)	(g)	(g)
1	77,9	8,5	69,4
2	91	8,4	82,6
3	130	8,5	121,5
		promedio	91,2

Material erosionado en bidón muestra de 50 ml

Repetición	Peso bandeja	Peso bandeja + Suelo Seco	Peso suelo seco	Volumen en bidón	Concentración	Material erosionado en bidón
N°	(g)	(g)	(g)	(l)	(g/l)	(g)
1	2,6	2,8	0,2	8	4	32
2	2,7	2,9	0,2	10	4	40
3	2,6	2,8	0,2	13	4	52
					Promedio	41,3

Material total erosionado

Repetición	Material erosionado	Promedio
N°	(g)	(g)
1	101,4	132,5
2	122,6	
3	173,5	