

Control del potencial de erosión de un suelo artificial, proveniente de una planta de aguas residuales domésticas

Abstract

30 puntos negrita

The geotechnical characterization of an artificial soil has been made. The mud used was taken from a domestic waste water treatment plant. For evaluating this characterization, tests on consistency limits, granulometry through hydrometers, Proctor standard, permeability and specific gravity were made.

An environmental characterization of this artificial soil was also made. Data from a parallel investigation for a possible usage of this material in agricultural activities of this same material was used for this characterization.

A complementary part of this investigation is focused in analyzing the erosion potential of this artificial soil due to the effects of rainfall.

In order to measure soil erosion, a hydrologic simulator was designed in order to control the intensity of rainfall that could reproduce precipitations able to produce soil erosion. The simulator has a hydraulic system that controls the pressure of its four sprinklers. This way, intensity inside the simulator can be quantified.

An acrylic tray with an exposed area of 0, 25 m² and a thickness of 0, 1 m, was built in order to place the soil material and to simulate a slope. This tray has a canoe in its base that allows measuring runoff and soil erosion; as well as holes of the bottom where the infiltration was measured.

Finally, many tests were made by adding different kinds of cement to this artificial soil material. The purpose of this was to find the optimal percentage of cement to lower erosion of the new artificial soil taking into consideration price minimal costs as well.

Keywords: artificial soil, erosion, mud, soil

Resumen

Se realizó la caracterización geotécnica de un suelo artificial, proveniente de un lodo de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas. Los ensayos practicados para dicha caracterización incluyen límites de consistencia, granulometría mediante el uso de hidrómetros, Proctor estándar, Permeabilidad y Gravedad Específica del nuevo material en estudio.

También, se realiza una caracterización ambiental de este suelo artificial esto se realizará tomando los datos de una investigación realizada de forma paralela al mismo material y evaluándolo para un posible uso en actividades agrícolas.

El complemento de la investigación se centra en analizar el potencial de erosión del suelo artificial en estudio, esto tomando como punto de partida la caracterización mecánica que pueda influir en el potencial de erosión que presente este suelo ante fenómenos de precipitación.

Para la medición de la erosión y así poder controlar la intensidad de lluvia a la que pudiera ser sometida un material en escala real, se debió diseñar un simulador hidrogeológico que pudiera reproducir precipitaciones que pueden producir erosión en un suelo, por lo que cuenta con un sistema hidráulico que controla la presión con la que trabajan los cuatro aspersores con los que cuenta y saber cuantificar la intensidad que se presenta dentro del simulador.

Por lo cual se fabrica una bandeja de acrílico para colocar el material con un área expuesta de 0,25 m² y un espesor de 0,1 m; la cual funcionó para simular un talud; dicha bandeja cuenta con una canoa en la base del mismo para medir escorrentía y erosión; así como agujeros en el fondo donde se midió la infiltración.

Por último, se realizaron varios ensayos con agregando al material diferentes contenidos de cemento, esto con motivo de buscar el porcentaje óptimo que logre disminuir el potencial de erosión característico de nuevo suelo artificial siempre tomando en cuenta la razón de costos mínima.

Palabras Clave: suelo artificial, erosión, lodo, suelo

Control del potencial de erosión de un suelo artificial, proveniente de una planta de aguas residuales domésticas

KEVINGERARDO MARTÍNEZ NAVARRRETE

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Septiembre del 2016

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Control del potencial de erosión de un suelo artificial, proveniente de una planta de aguas	1
Prefacio	1
Resumen ejecutivo	2
Introducción	4
Antecedentes	7
Objetivos	9
Marco Teórico	10
Resultados	28
Análisis de los resultados	39
Conclusiones y Recomendaciones	44
Apéndice	46
Anexos	47
Referencias.....	48

Prefacio

La disposición de los desechos producidos por actividades humanas, se ha convertido en tema urgente para un sin número de países alrededor del mundo, esto se debe a que no existe una forma de eliminarlos, ya que son los desechos de las actividades cotidianas e incluso de necesidades fisiológicas de la especie humana.

La gran mayoría de las ciudades importantes en el mundo poseen plantas de tratamiento de aguas residuales, ya sean domésticas, industriales o municipales que producen cantidades gigantescas de lodo, el cual es el subproducto del tratamiento de dichas aguas y que en la mayoría de las ocasiones termina vertiéndose en ríos, lagos o lagunas de oxidación sin ningún tipo de estudios de los efectos que este puede causar al entorno.

Esta investigación pretende ayudar a encontrar una reutilización de ese material que se desecha sin ser utilizado en alguna otra actividad, para iniciar con este proyecto se seleccionó una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas tomando como criterios de selección el tamaño y la disponibilidad de estas en las nuevas zonas residenciales.

Lo que se pretende es extraer el lodo que se desecha y realizarle ensayos de caracterización geotécnica y ambiental, para saber de forma precisa la caracterización del lodo en estudio; para luego realizarle tratamientos que mejoren las características mencionadas anteriormente y pueda ser usado como un suelo artificial en zonas de recuperación de tajo o simplemente como material de relleno o filtro de en estratos contaminados.

La investigación tiene como objetivo evaluar las características del suelo artificial producido por el lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas domésticas, esto en términos de su potencial de erosión.

Dicha evolución se realizará mediante pruebas de laboratorio tanto geotécnicas como ambientales, esto para conocer mejor el material y tener parámetros de las características que

influyen en los procesos de erosión. Por ello, primero se someterá al suelo sin ningún tipo de material cementante a un ensayo de erosión realizado mediante un simulador hidrogeológico que permite cuantificar los valores de erosión, infiltración y escorrentía.

Esta primera prueba servirá como patrón para luego variar diferentes porcentajes de cemento que minimicen no solo la erosión; sino que la infiltración y la escorrentía presentes valores razonables; además de tener en cuenta siempre obtener una razón de costo menor, ya que, por ende, estos beneficiarán a convertir un desecho en un material con características geotécnicas determinadas y que podrá ser utilizado como material de relleno o en zonas de recuperación de tajo en cualquier momento.

Quisiera agradecer primero a Dios por darme las oportunidades para llegar a ser quien soy. A mi madre que es mi motor para seguir adelante cada día y todos los miembros de mi familia que confiaron en mí en los momentos buenos y malos.

Al Ingeniero Gustavo Rojas Moya y al Doctor Rafael Baltodano Goulding, mentores y maestros en toda mi carrera universitaria y a los cuales agradezco su confianza y apoyo incondicional.

A mis amigos que durante estos años fueron mis compañeros, funcionarios y profesores de esta gran institución que llamamos TEC.

*“Hay hombres que luchan un día y son buenos.
Hay otros que luchan un año y son mejores.
Hay quienes luchan muchos años y son muy buenos.
Pero los hay que luchan toda la vida
esos son los imprescindibles”*

Bertolt Brecht

Resumen Ejecutivo

La evolución del desempeño de un suelo artificial en términos del potencial de erosión, inicia con la selección de la materia prima que servirá para la producción del suelo artificial; para el caso se utilizará un lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas domésticas del Residencial Las Palmas ubicado en Ciudad Colón en la provincia de San José.

El material se extrajo con quince días de estar en un lecho de secado y, posteriormente, se ingresa al horno a 60° Celsius por cuatro días y medio, estos nos ayudará a obtener una edad de secado mayor en un tiempo más corto y del mismo modo se está garantizando que el material cumple a cabalidad con lo solicitado por las normas ASTM.

Finalizado el proceso de secado de los 22 Kg de material extraído de la planta de tratamiento, se inició con los ensayos de caracterización geotécnica, comenzando con la prueba de plasticidad; la cual no se pudo realizar de manera completa debido a que las características del material que presentó variaciones considerables en la humedad, dando como conclusión que el suelo analizado presentaba características no plásticas.

El ensayo de gravedad específica se realizó mediante picnómetros, tal como lo indica la normativa ASTM D854-14; presentando cierta dificultad al dejar sumergiendo el material en el picnómetro debido a que este flotaba con facilidad; además de tomar en cuenta la pérdida de material al tomar el peso seco, debido a la quema de material orgánico. Obteniendo valores de gravedad específica de 1,787, característico en suelos orgánicos.

Para determinar la granulometría del suelo artificial, se decidió realizar mediante la prueba de hidrómetro y no mediante mallas; esto fundamentado en que el material al salir del horno el material se aglutina de manera que parece un agregado granular, pero al tener contacto de nuevo con el agua, estos grumos se desintegran en un material pastoso por lo que si

se realizaba la prueba mediante malla, se estarían tomando valores de granulometría que no son los verdaderos del material en cuestión, por medio del hidrómetro se demostró que el tamaño de las partículas que conforman el suelo artificial varían de 0,015 mm hasta los 0,0006 mm.

En relación con la permeabilidad, muestra valores muy por debajo de suelos similares, esto se debe reprochar a que la prueba de permeabilidad en carga variable no se completó de manera correcta debido a que no se aseguró la saturación total del espécimen, dando como resultado un valor de conductividad hidráulica de $1,29 \times 10^{-9}$ m/s. El ensayo de Proctor estándar fue suministrado por una investigación que se realizaba de forma paralela a esta; dando como resultado una densidad seca máxima de 1520 kg/m^3 con una humedad del 77%; estos datos se usaran para el momento en que el material se moldee para el ensayo de erosión.

La caracterización geotécnica del suelo artificial indica que este tipo de suelo presenta gran similitud con suelos conformados por cenizas volcánicas, esto basado en los resultados de los ensayos descritos anteriormente y comparando con investigaciones realizadas suelos volcánicos en otros países, por tanto, se puede clasificar como un limo de alta plasticidad según la clasificación SUCS.

Con respecto a la evolución ambiental, se realizan ensayos sobre varios parámetros, donde cumple de manera parcial para un uso agrícola, pero teniendo en cuenta que debe ser mejorado mediante un correcto secado en la planta de tratamiento y realizando pruebas de pH donde se pretenda utilizar el suelo en mención.

La fabricación del simulador artificial se realizó en el LabCIVCO específicamente en el sótano, pues tenía la facilidad de contar con una pila de desagüe, dicho simulador consta de una estructura de metal de 1,9 m de altura y 0,7 m de ancho; con un sistema de cuatro aspersores de la serie VAN de la marca *RainBird*.

Se realizó esta selección basados en el tamaño de la gota que expulsa el aspersor y que presenta ángulos de aspersión pequeños adecuados al modelo.

Cabe mencionar que el sistema hidráulico del simulador hidrogeológico está conectado a la red de suministro del *LabCIVCO*, por que se cuenta con un fluxómetro y un manómetro, estos para asegurar el funcionamiento de los aspersores correcto.

Para colocar el material en el simulador, este cuenta con una bandeja de acrílico de 1 m de largo y 0,5 de ancho que permite colocar tres distintos estratos de suelo, además de tener los accesorios que permite medir la erosión (canao en la parte inferior), infiltración (agujeros en el piso) y escorrentía (canao parte inferior). La calibración del simulador se realiza por medio de probetas que se ubicaban en cada extremo de la bandeja donde se tiene una idea de la precipitación, dando como resultado una intensidad de 59,20 mm/hr, pues con este dato se asegura un aguacero fuerte además mantener la presión constante que produce el valor de intensidad requerido. El periodo de duración del fenómeno se toma de quince minutos, esto fundamentado en que sería el tiempo máximo en que una lluvia pueda mantener un valor de intensidad constante.

Para la realización del ensayo de erosión la bandeja se llenó con 9,66 kg de material a 10 cm de espesor, debido a que por motivos de escasez del mismo solo se utilizó la mitad de la bandeja; también se selecciona un ángulo de inclinación fijo de la bandeja de 18,94° esto debido a la limitación de que el simulador se encuentra en un sótano y presenta restricciones de altura al elevar la bandeja.

En el proceso de moldeo del material en la bandeja, se hace imposible reproducir la densidad seca máxima requerida, esto debido a que el acrílico con que está elaborada no soporta impactos tan fuertes como el del maso, por lo que se realiza una compactación aproximada pero que no es la seca máxima.

En la primera prueba se somete solo el material sin ningún contenidos de cemento dando como resultado una erosión de 2,11 g retenidos

en la canoa de la base de la bandeja, con una infiltración del 88,3% del agua caída durante el ensayo 5550 ml y con una escorrentía de 735 ml equivalente al 11,7 % del agua caída durante el evento.

Al añadir 0,966 kg de material cementante, un 10% del peso total de la muestra, los datos de erosión disminuyen a 0,66 g, con valores de infiltración de 910 ml equivalente a un 51,95 del agua llovida y una escorrentía de 845 ml correspondientes a 48,1% del agua caída sobre la bandeja.

Al añadir un 20% de material cementante (1,932 kg), la erosión continua disminuyendo al igual que lo hace la infiltración pasando a ser de 275 ml y la escorrentía de 665 ml, siendo el 29,3% y 70,7 % del agua caída durante el evento respectivamente.

Al agregar 2,898 kg de material cementante, equivalentes al 30% del peso total de la muestra de suelo artificial, siempre se presenta una disminución considerable en la erosión, pues llega al valor mínimo de los ensayos con solo 0,310 g. Pero se presenta un aumento considerable en los valores de infiltración con 1255 ml equivalente a 60% del agua caída durante el ensayo y la escorrentía que llego a ser de 835 ml equivalente al 40% del agua llovida.

Como lo evidenciaron los datos mostrados anteriormente, el material presenta un porcentaje de erosión importante; tomando en cuenta que la intensidad y el ángulo de inclinación pudieran ser mayores, por lo que la selección del porcentaje de cemento óptimo no solo debe obedecer al porcentaje que presente menor erosión; también debe cumplir con una razón de costo sino que afecte de manera positiva las demás variables como la infiltración y la escorrentía.

Por tanto, se selecciona un porcentaje de cemento a añadir al material del 20% del peso de la muestra, esto tomando en cuenta la razón de costo menor y la optimización de las variables como infiltración y escorrentía, además que es el porcentaje de cemento que tiene menor afectación a las características físicas del suelo artificial

Limitaciones

- El lodo utilizado no fue evaluado mediante ensayos de toxicidad TCLP.
- El simulador hidrogeológico no cuenta con un suministro de agua constante, ya que no cuenta con un tanque ni una bomba que suministre agua al sistema de manera constante y no se tengan picos de caudal y presión.
- El simulador no toma en cuenta el tamaño de gota, ni la velocidad de caída de las mismas.
- No cuenta con una altura suficiente para asegurar una velocidad constante al momento del impacto con el suelo.
- El simulador cuenta con variedad de ángulos de inclinación, pero debido al lugar donde se encuentra, los ensayos serán ejecutados con el ángulo mayor que pueda ser utilizado.
- Los ensayos realizados en el simulador hidrogeológico no buscan validez estadística, sino un punto de partida para futuras mejoras al dispositivo.
- Al ser el área de la bandeja tan reducida no se pueden aprovechar al máximo la capacidad de los aspersores.
- El agua medida para los aspectos de infiltración y escorrentía no serán evaluadas con respecto a la calidad de agua.

Introducción

La población humana crece a tasas desproporcionadas y con este crecimiento salen a relucir problemas como el manejo de desechos producidos por actividades humanas; la ingeniería en su responsabilidad de facilitar los problemas de la humanidad incursiona en encontrar una manera útil y segura de realizar la disposición de estos desechos.

Los desechos domésticos representan tan solo una pequeña parte de todos los que son producidos por actividades humanas; estos se producen por medios de actividades como lavar platos, desechos de comida, bañarse y de las necesidades fisiológicas; en el país no todas las urbanizaciones o los vecindarios cuentan con una planta de tratamiento para dar el tratamiento adecuado a este tipo de aguas residuales; pero en los lugares que si cuentan con una planta para dicho fin se producen gran cantidad de lodos que no se sabe con certeza cuál será su utilidad luego de finalizar el proceso de secado en el lecho de la planta.

La finalidad de esta investigación está en encontrar una aplicación geotécnica a dicho material, tomando en cuenta aspectos como la salud pública y el desempeño que este lodo tratado tendrá como un posible suelo artificial; esto sin dejar de lado la razón de costo que implicaría la preparación para convertir ese lodo en un suelo artificial que sea útil en alguna actividad humana.

La producción de este lodo comienza en un desarenador de una planta de tratamiento de aguas domésticas, donde luego pasa a un tanque de aireación donde por medio de procesos aerobios la materia orgánica es procesada por las bacterias que desarrolla este tipo de digestión, este proceso produce como resultado una pasta de color café claro que son los residuos de la digestión realizada por las bacterias.

Esta pasta de color café se debe escurrir en unos lechos de secado hasta cumplir entre doce y quince días que se seca de manera parcial y se debe botar.

Para la investigación se toma este lodo, el cual es el subproducto de una planta de tratamiento de aguas domésticas, como la materia prima que dará origen al suelo artificial que se implementará como material de relleno en zonas de recuperación de tajo u cualquier otra aplicación geotécnica deseada.

La utilización de lodos de plata de tratamientos en aplicaciones geotécnicas no es un tema nuevo a nivel mundial, ya que incluso se han realizado prueba a escala real del este material como un suelo artificial (Bobba, 2005); incluso en el país se realizaron investigaciones para conocer su caracterización geotecnia y ambiental (Rivera, 2012) y la edad optima de secado que este debe tener para su correcta utilización (Solano, 2015).

Para la investigación, se va a centrar específicamente el desempeño geotécnico que presente este suelo artificial en términos del potencial de erosión, debido a que el principal problema que presenta este nuevo tipo de suelo radica en el contacto con el agua, lo cual provoca la regresión de un material consistente a una mezcla de agua con materia orgánica.

Como primer paso, se realiza una caracterización geotécnica del material donde no se pretende saber todas las propiedades físicas que presente este tipo de suelos, sino las que más puedan tener relación con el fenómeno de la erosión, como lo son sus plasticidad, granulometría, permeabilidad, gravedad específica así como la densidad que este material podría tener en el campo para una eventual aplicación

Posteriormente, se debe entender el fenómenos de la erosión y las variables que afectan a un suelo cuando se produce la erosión, cuando se habla de este tipo de variables se deben tener en cuenta conceptos de hidrología que ayudarán a entender de una manera más adecuada los aspectos importante a realizar en el trabajo y que servirán en la modelación del fenómeno a reproducir.

En el proceso de modelación de un fenómeno como la precipitación, se realiza

mediante un simulador hidrogeológico el cual deberá de reproducir eventos climatológicos capaces de producir las condiciones que propician la erosión en el suelo; para lo cual se cuenta con una estructura de acero que sostiene un sistema de tuberías que se conectan con cuatro aspersores que pueden reproducir de manera homogénea en el área de interés del simulador una precipitación con una intensidad mayor a 50 mm/hr. Mientras que en relación con el suelo, se fabrica una bandeja de acrílico con un piso falso que permite la variación del espesor del estrato de suelo para tres diferentes medidas de espesor, así como un sistema de paleas que puede variar el ángulo de inclinación de la bandeja de cero a noventa grados.

La preparación del material consiste en ingresar el lodo al horno por tiempo ya establecido

mediante una investigación realizada al mismo lodo (Solano, 2015), el lodo al salir del horno material presenta un cambio en su apariencia física; dado que al salir del horno el material parece ser un agregado grueso similar a la piedra cuarta.

El material se coloca en la bandeja, donde se debe compactar con base en la humedad seca máxima, para luego ser sometido al ensayos de precipitación donde se someterá a una precipitación seleccionada por un tiempo estipulado, durante el ensayo se medirán variables como infiltración, escorrentía y erosión.

En la etapa final del proyecto, se procede a realizar el ensayo de erosión agregando diferentes porcentajes de cemento al material, hasta obtener los valores que minimicen la escorrentía, infiltración y erosión que sufre el estrato utilizado.

Antecedentes

La gran problemática que se ha generado en relación a la disposición final de los desechos, no solo abarca los esfuerzos de las entidades gubernamentales sino el de toda la comunidad global, pues cada día crece más la preocupación de la gran cantidad de desechos generados a nivel global, debido a que la producción de desechos tendrá siempre una relación directa con la población existente y que para la situación actual dicha población siempre se encuentra en constante crecimiento; la conservación de un recurso tan vital como el agua resulta de una importancia primordial, lo cual obliga a la construcción de plantas de tratamiento de aguas pardas de las cuales subproductos del tratamiento biológico generado en la planta en mención los cuales no pueden desecharse de forma simple en rellenos sanitarios, desembocaduras a corta distancia de la costa o lagunas, alternativas que durante años han sido la principal opción para el desechos de lodos de plantas de tratamiento de agua pardas. (Sorrequieta, 2004)

En países como México incluso se realizan análisis de los lodos generados por las plantas de potabilización de agua, donde el eje principal de estudios de dichos lodos radica en el impacto ambiental que puede tener un proceso de importancia vital para la sociedad como la potabilización de agua y el estudio detallado de los subproductos generados en el proceso de potabilización; debido a que esos subproductos presentan contenidos altos de coagulantes para la eliminación de sólidos en suspensión, hidróxidos y material suspendido presente en el agua (Cerón, Millán, Espejel, Rodríguez, & Ramírez, n.d.). También cabe destacar los estudios que se realizan específicamente a los lodos generados de las plantas de tratamiento de aguas pardas donde la mayoría de contaminantes contenidos en estas aguas se eliminan en gran medida por la absorción en el lodo mediante procesos fisicoquímicos o biológicos, dichos subproductos deben cumplir

con diferentes análisis que garantizan que no son peligrosos para sus usos futuros, entre estos análisis destacan la corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, biológico-infecciosas y bacterias patógenas; ya que todos estos análisis tienen estipulado según investigaciones anteriores sus valores máximos para su correcto uso y puesta en práctica. (García, 2006)

A nivel nacional, la preocupación por la disposición de los residuos provenientes de desechos humanos ha provocado que el gobierno centre esfuerzos en tratar de reducir y dar tratamiento de los desechos de la mayoría de centros urbanos del país por lo cual el Poder Ejecutivo firma el *Decreto Ejecutivo 36160-S del 05 de octubre del 2010*; donde declara de interés público y nacional la puesta en práctica de acciones para el tratamientos de aguas residuales domesticas "lodos sanitarios" (Villalobos Villalobos & Incer Arias, 2010) es importante mencionar que el país no escapa del mal manejo de los lodos generados por diferentes plantas de tratamiento, ya que el lugar de desecho es un río o lagunas naturales, esto se da sin que exista ningún análisis de los ya mencionados que deben realizarse para determinar la peligrosidad del lodo. En el país donde existen seis plantas de tratamiento de aguas pardas con los debidos permisos respectivos se estiman que tratan 59904 m³ por año, produciendo 175000 m³ de lodos anuales los cuales menos del 10% tienen alguna reutilización o nueva aplicación (Villalobos Villalobos & Incer Arias, 2010). La utilización de este prototipo de suelo artificial generado en base a la mezcla de lodo, agua y material cementante, se viene investigando en diferentes ejes temáticos como su aplicación para elaborar materiales de construcción (Cerón et al., n.d.) además se ha realizado investigaciones de la caracterización geotécnica de este prototipo de suelo con contenido de desechos de horno de fabricación de cemento donde se determinó como una arena limosa con grava y limo orgánico

arenoso según la clasificación SUCS (Rivera, 2012).

Lo que se pretenden a nivel nacional es tratar de dar algún uso alternativo a este prototipo de suelo artificial, para así contribuir en reducir el impacto ambiental generado por este subproducto al ser desechado en alcantarillado, cuerpos de agua, tiraderos a cielo abierto sin ningún tipo de tratamiento previo lo que repercute en la contaminación del suelo, agua subterránea o la atracción de vectores “*insectos, ratas o carroñeros*”, generando problemas de contaminación de mantos freáticos y salud pública, al tener establecido un uso alternativo como lo puede ser la recuperación de zonas de tajo o para ser utilizado como material de relleno, así se contaría con un uso específico para la disposición de dichos lodos, los cuales deberían cumplir con propiedades geotécnicas y ambientales para su correcta aplicación.

El presente proyecto lo que busca es realizar un análisis del potencial de erosión de un suelo artificial, en el cual su componente principal “*lodo*” es un subproducto de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, para el caso en estudio, se utilizará el material proveniente de una planta de tratamiento ubicada en el residencial Las Palmas en Ciudad Colón; dicho lodo será analizado mediante ensayos geotécnicos para así determinar si posee las características de un suelo competente y se tomarán los resultado de ensayos ambientales de una investigación realizada al mismo lodo (Solano, 2015) debido a que estos no serán realizados en el presente proyecto; estos estudios ambientales servirán para corroborar la poca peligrosidad que presenta los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, tal como lo demuestra (Cerón et al., n.d.) en su investigación ambiental de dichos lodos. Luego se medirá mediante un aparato hidrológico el comportamiento de dicho suelo artificial con diferentes porcentajes de material cementante 10%, 20% y 30% sometido a un factor externo, el cual es la precipitación para así conocer cómo se ven afectados aspectos como erosión, precipitación e infiltración. Esto permitirá obtener una razón de costo optima la cual consta, del porcentaje de cemento entre el costo que conllevaría para la planta de tratamiento la comercialización de dicho suelo artificial; ya con niveles de erosión aceptables para poder ser

utilizado en zonas de recuperación de tajo o rellenos.

Objetivos

Objetivo General

- Evaluar el desempeño geotécnico del suelo artificial en términos de su potencial de erosión mediante ensayos de laboratorio.

Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades del suelo artificial que puedan influenciar el potencial de erosión.
- Analizar el potencial de erosión del lodo en estudio.
- Optimizar porcentajes de material cementante para reducir el potencial de erosión del suelo artificial en estudio.

Marco Teórico

Aguas Residuales y Lodos

La materia prima utilizada en el experimento es un subproducto de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas; que para esta etapa inicial se llamará lodo y está compuesto en su mayoría por aguas servidas y desechos domésticos, los cuales pueden provenir de mezcla de áreas residenciales y comerciales estas ultima en menor cantidad que las domésticas.

El tratamiento que reciben las aguas residuales depende fundamentalmente de los límites de vertido para el afluente. El tratamiento al que se someten las aguas residuales consta de tres etapas, por lo que se denominan tratamientos primario, secundario y terciario. El tratamiento primario consiste en la remoción de sólidos en suspensión y materiales flotantes, el proceso de eliminación depende de manera directa de la capacidad para llevar los afluentes a un tratamiento secundario; el tratamiento secundario se basa en tratamientos biológicos convencionales y el tratamiento terciario se enfoca en eliminar contaminantes que no pueden ser removidos de manera convencional (Rahalmo, 1990).

Lodos Activados

Es un proceso de tratamiento biológico para aguas residuales aerobio (presencia de oxígeno), el lodo se compone de una población variada de microorganismos: bacterias unicelulares, hongos, algas, protozoos y rotíferos. Siendo las bacterias las que juegan un papel más importante, ya que son las responsables de hacer los procesos digestivos al asentarse los sólidos (Rahalmo, 1990). El proceso que da origen a los lodos

activos inicia cuando se introduce el aire a la mezcla completa (material asentado y deshidratado), para proporcionar oxígeno a los microorganismos aerobios para que remuevan la materia orgánica y realizan sus funciones metabólicas de crecimiento y reproducción (Vidal, 2014), lo cual genera un lodo residual con menor contenido de materia orgánica debido a la digestión aerobia de las bacterias.

Línea de Lodos

La línea de lodos comprende un proceso mucho más amplios que el descrito a continuación, por lo cual se especifica que dicho concepto solo aplica para la planta utilizada en esta investigación.

La línea de lodos consiste en el proceso que se le da a las aguas residuales, desde el momento en que llegan a la planta de tratamiento hasta que se convierten en un producto final que no es peligroso para la salud pública; dicho proceso inicia en una rejilla que evita el ingreso de material no orgánico a la planta, luego atraviesa por desarenadores para luego ingresar al tanque de aireación donde se producen los lodos activos, después se pasan a un sedimentador secundario donde los lodos se deshidratan en gran parte para luego pasarlos a lechos de secado que es donde se obtiene el "*Lodo Digerido Aeróbicamente*" que es el material requerido en la investigación. (Dilek, F.;Clarkson, W.;Aerne, 2011).

Suelo Artificial

Se puede definir como un producto manufacturado con una función específica, la cual es comportarse como un suelo; esto se logra mediante la mezcla de materiales como lodos de plantas de tratamiento, cenizas volcánicas o carbón natural. Además de la presencia de

aditivos que mejoren ciertas características geotécnicas del suelo. (Solano, 2015).

Hidrología

Una de sus muchas definiciones, pero quizás la más completa es “*La Hidrología en la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución con el medio ambiente, incluyendo seres vivos*” (Chow, 1964)

Tomando como punto de partida esta definición se debe limitar la parte de la hidrología que es inherente a la ingeniería; la cual se denomina hidrología aplicada; esta incluye aquellas ramas de la hidrología relacionadas con el diseño y operación de proyectos que involucran el control y aprovechamiento del agua (Aparios, 1989).

Ciclo Hidrológico

Se define como los cambios de estado y forma del agua en la naturaleza; comprende la fase que se origina entre la precipitación sobre el terreno y sus cambios de estado que originan su retorno a la atmósfera y el océano. Al ser un ciclo no presenta ni principio ni fin, su estudio y descripción puede iniciar en cualquier punto (Villón, 2004).

Este concepto comienza a ser visto desde otra arista a partir de la segunda mitad del siglo XX donde se comienzan realizar estudios de la variabilidad del clima a nivel global, y que comenzaban a comprender más la influencia de fenómenos como el del Niño (Retana, 2012); el aumento en el conocimiento y comportamiento de este fenómeno da como origen el concepto de cambio climático, el cual es el responsable de las alteraciones en los eventos hidrometeorológicos, como por ejemplo, las fuertes lluvias en ciertas regiones del país y la desaparición de estas en otras regiones.

La variación de o alteración de elementos climatológicos contribuye a moldar paisajes mediante la acción erosiva, de arrastre y sedimentación. (Retana, 2012)

Precipitación

Es la humedad que se origina en las nubes y llega hasta la superficie de suelo mediante diferentes formas (llovizna, lluvia, escarcha, nieve y granizo), además de esta humedad comprende fuente primaria del agua superficial de la tierra. (Villón, 2004).

En la actualidad, la ausencia o exceso de precipitación provoca lo que son conocidos como eventos hidrometeorológicos extremos, estos reciben esta clasificación tomando en cuenta la el impacto social, económico y ambiental que cause en la región que se originen; así como la vulnerabilidad del sistema que se está siendo afectado (Retana, 2012). Por ejemplo, la sequía en la zona de Guanacaste por causa del fenómeno del niño o las inundaciones en la ciudad capital debido a las fuertes precipitaciones que causan la inmovilización del comercio o el tránsito.

Tamaño de Gota

El concepto de tamaño de gota se relaciona al origen de la precipitación, debido a las características de las gotas cuando están en las nubes (diámetro 0.02 mm, espaciamento entre gotas 1mm y masa entre 0.5-1 g/m³) son inferiores a las características de las gotas de lluvia (diámetro de 0.5-2 mm y un aumento de volumen de cien mil a un millón de veces); este aumento que origina la precipitación se debe a la unión de las gotas en la nube y el engrosamiento por fusión y condensación de otras (Villón, 2004).

Este concepto tiene su importancia en la primera etapa de la erosión, la cual se produce cuando las gotas golpean el suelo desnudo; provocando por el impacto que el suelo se rompa en pequeños fragmentos que salpicaran a una altura máxima de 60 cm y un radio de 1.5 metros sobre la superficie, dando lugar al fenómeno de *Erosión por Salpicadura*, la salpicadura tiene diferente respuesta según el tipo de suelo y tamaño de gota (NSW Department of Primary Industries, n.d.).

Intensidad

Es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo, en relación a la intensidad, lo que interesa en la intensidad máxima la cual es altura

máxima de agua en un área determinada que se presentó.

La intensidad se relaciona con otro término tratado más adelante como el periodo de retorno, en el país los datos de intensidad así como de duración, frecuencia e índice de erosividad anual son tomados de estaciones pluviográficas establecidas por el Instituto Meteorológico Nacional; mediante estas se obtienen datos de diferentes regiones del país relacionados con la intensidad.

Tomando en cuenta solo las intensidades extremas en la zona atlántica se dan intensidades altas en largos periodos de duración del evento; en la zona norte las mayores intensidades se dan en periodos de duración cortos; en el Pacífico Norte, las intensidades se dan en periodos de duración aún más cortos que en la zona norte; mientras que en el Pacífico Central y Sur la intensidad disminuyen un poco con respectos al Pacífico Norte pero aumentan los periodos de duración de los eventos (Vahrson, Romero, Arauz, Sánchez, & Chacón, 1992).

Con respecto a los índices de erosividad, los valores más altos se encuentran en la zona atlántica y pacifico sur, por lo cual son aspectos importantes al momento de realizar construcciones u obras de infraestructura (Vahrson et al., 1992).

Escurrecimiento

Es el agua que proviene de la precipitación, que se mueve ya sea sobre o bajo la superficie terrestre, para luego ser drenada en una salida. Al caer la precipitación sobre la superficie terrestre un porcentaje se infiltra en los estratos del suelo tanto por encima o bajo el nivel freático, otro pequeño porcentaje se evapora y el resto tiende a escurrir mientras que una parte se pierde (Aparios, 1989). El agua escurrecida se divide en tres caminos, los cuales son:

- Superficial: Se origina gracias a la precipitación en exceso, y es la cantidad de agua que no se infiltra en el suelo y que escurre sobre la superficie del suelo, este tendrá origen durante la tormenta y después de ella (Villón, 2004).
- Subsuperficial: Es un porcentaje de la precipitación infiltrada, este fenómeno se puede dar inmediatamente después de

iniciada la precipitación o de manera retardada (Villón, 2004).

- Subterráneo: es el agua que se infiltra por niveles inferiores al freático (Aparios, 1989).

Periodo de Retorno

Se refiere al intervalo de tiempo promedio, dentro del cual un evento establecido previamente puede ser igualado o excedido. En al menos una vez en promedio (Villón, 2004).

“Ellio Coen París (1967), recomienda que se utilicen períodos de retorno iguales o menores a 10 años, debido a que la extrapolación realizada para períodos de retorno mayores de 10 años puede conducir a errores grandes, ya que él trabajó con series de 11 años en promedio” (Villón, 2004).

La mayoría de datos de intensidades extremas el país fueron calculadas con periodos de retorno en un rango de 2 años hasta 200 años; en las zonas lluviosas del país como la zona atlántica y Pacífico Sur los eventos de lluvia con intensidades extremas se presentan con periodos de retorno de entre 100 y 200 años mientras que en el pacifico norte las intensidades extremas se alcanzan en periodos de retorno de 10 a 20 años (Vahrson et al., 1992).

Los periodos de retorno de fenómenos extremos han sufrido el impacto de fenómenos como el cambio climático y el urbanismo desorganizado, en el país se pudo ver evidenciado con las inundaciones de octubre del 2015 en la zona este de la capital, donde en un solo día llovió el 25% de lo que se espera que llueva en ese mes; con datos acumulados de 40-70 mm/m² en tres horas (Recio & Fallas, 2015).

Estos datos demuestran que eventos extremos ya no se dan según lo establecido en sus periodos de retorno, sino que agentes externos a los fenómenos climatológicos están interviniendo para que se den con menor tiempo incluso meses o días; a esto se suma en el impacto que tiene sobre la vida diaria; al ser San José una ciudad con un crecimiento poco controlado en relación con planes reguladores, no se toma en cuenta la disposición de las aguas pluviales que están causando inundaciones y pérdidas económicas.

Erosión

Un problema de erosión siempre tiene 3 componentes: el suelo o roca, el agua y la geometría de los obstáculos que estén interactuando por el agua. El suelo o roca se caracteriza por la erosionabilidad; la acción del agua se determina por la su velocidad y la geometría de los obstáculos se determina por las dimensiones.

Para poder entender el estudio de la erosión se debe comprender el análisis de las partículas de suelo o roca; en el caso suelo artificial en dos diferentes escenarios como un entorno estático y otro dinámico.

Análisis Estático

Es el análisis del diagrama de cuerpo libre de una partícula de suelo por ejemplo en el fondo de un lago o cualquier cuerpo de agua donde la velocidad del fluido sea cercana a cero; donde se somete a esfuerzos normales debido a la presión hidrostática, fuerzas de contacto con otras partículas y unas poco conocidas llamadas fuerzas eléctricas entre partículas; los esfuerzos normales son más altos en el fondo de la partícula esto debido a la relación con la columna de agua, esta diferencia de esfuerzos normales provoca una fuerza boyante que reduce el peso de la partícula provocando su desprendimiento (Briaud, 2013).

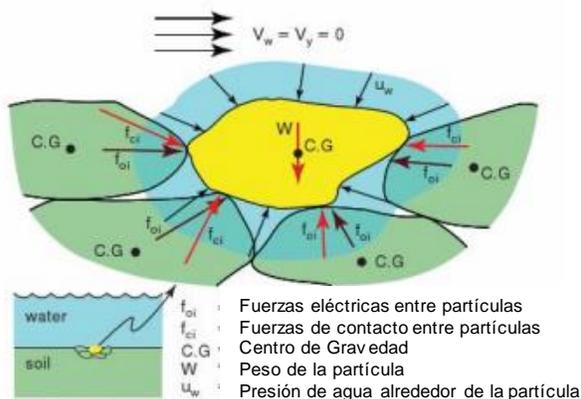


Figura 1. Análisis de una partícula de suelo en un entorno estático. (Briaud, 2013)

Análisis Dinámico

Es un diagrama de cuerpo libre de una partícula inmersa, por ejemplo en un río (fluido en movimiento), cuando el agua está en movimiento se pueden tomar en cuenta tres aspectos.

- Fuerza de arrastre: se relaciona con el esfuerzo cortante que se desarrolla en la interface entre la partícula de suelo o fragmento de roca con el agua en movimiento.
- La fuerza normal ejercida en la parte superior de la partícula decrece debido al movimiento del agua; cuando la velocidad incrementa alrededor de la partícula ya que la presión de arrastre se mantiene constante de acuerdo con el principio de Bernoulli. En este caso, la presión es más baja que en la parte inferior de la partícula (esto provoca que la partícula se desprenda).
- Los esfuerzos normales y cortantes aplicado a los limites fluctuantes con el tiempo, esto debido a la turbulencia en el agua. Estas fluctuaciones se originan en la aparición y desaparición de remolinos, vórtices, eyecciones y barridos en la masa de agua, todos estos fenómenos pueden afectar de manera directa los procesos de erosión especialmente a altas velocidades. En algunos casos, este aspecto es la principal razón de la erosión (Briaud, 2013).

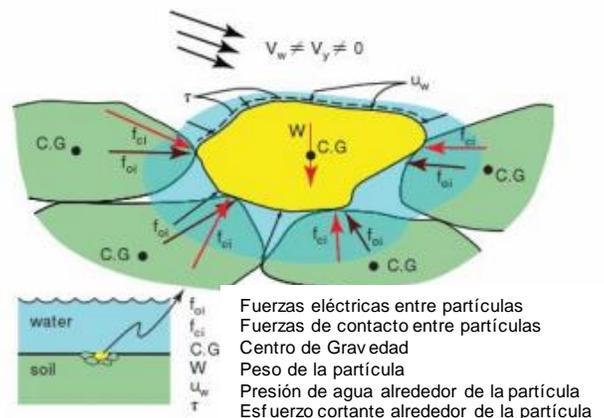


Figura 2. Análisis de una partícula de suelo en entorno dinámico. (Briaud, 2013)

Modelos de Erosión

La erosión de un suelo o roca se define como la relación entre la tasa de erosión (z) y la velocidad del agua (v) cerca de la interface suelo agua, aunque se sabe que la velocidad varía en dirección e intensidad en su campo de flujo. Sabiendo que la velocidad en la interface suelo-agua; la erosión se puede expresar de manera más exacta como la relación entre la tasa de erosión (z) y el esfuerzo cortante en la interface suelo-agua (Briaud, 2013). Tal como se muestra en la ecuación de la erosión:

$$\dot{z} = f(\tau)$$

z = Tasa de erosión

$f(\tau)$ = Esfuerzo cortante de la interface suelo-agua

Medición de la Función Erosión

La medición inicia cuando se va al sitio donde la erosión se está investigando, recoger muestras dentro de la profundidad requerida, para luego llevarla al laboratorio y realizar el ensayo en la maquina EFA (Aparato de función de erosión). Descripción del ensayo *“un tubo con un diámetro exterior de 75 mm, contiene la muestra que se coloca bajo el conducto donde el agua fluye a velocidad constante; el suelo o roca es empujado fuera del tubo de ensayo tan rápido como es erosionado por el flujo del agua; para cada velocidad es medido una tasa de erosión y un esfuerzo cortante usando el diagrama de Moody”*(Briaud, 2013)

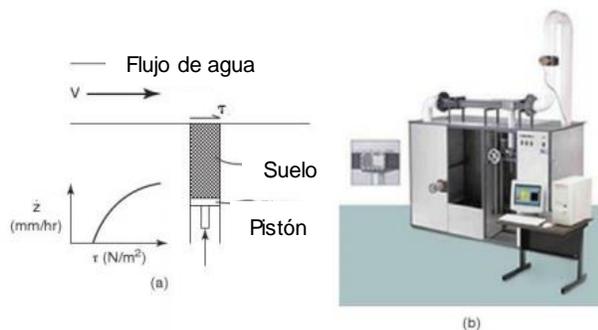


Figura 3. Máquina EFA encargada de medir la erosión y su esquema de funcionamiento. (Briaud, 2013).

Metodología

Este proyecto constó de tres fases para su realización, las cuales fueron la caracterización geotécnica del material como la fase inicial; la elaboración de un simulador hidrológico adecuado a las necesidades requeridas del proyecto (escala y ubicación) y, por último, la realización de pruebas que puedan dar el potencial de erosión de un suelo utilizando el simulador elaborado.

En la primera fase se realizaron los ensayos de caracterización geotécnicos que determinarán los parámetros necesarios para poder determinar el potencial de erosión del suelo en estudio.

Los ensayos para obtener los parámetros geotécnicos requeridos se realizaron con la ayuda del Laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, Laboratorio de Materiales del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). Estos últimos gracias a colaboración de una investigación desarrollada en paralelo (Solano, 2015) a la investigación desarrollada en este documento.

El material con el que se trabajó se considera un suelo artificial el cual es una combinación de materiales de desecho, en nuestro caso es el producto del tratamiento de aguas residuales domésticas, este material se extrae de la planta de aguas residuales domésticas del Residencial Las Palmas, ubicado en el distrito de Ciudad Colón el cual es cabecera del cantón de Mora en la Provincia de San José, Costa Rica.

Se realizó la coordinación respectiva con el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), institución encargada del correcto funcionamiento de la planta escogida para esta investigación. Donde se autorizó la extracción del lodo de los lechos de secado, lugar donde se encuentra en su etapa final de tratamiento y con una edad de secado de doce

días como se ve en la figura 4; esta edad se debe a que no es recomendable trabajarlo con una edad inferior a cuatro días ni mayor a quince días, debido a que si se deja más de quince días estaría entorpeciendo el proceso de purga de la planta (Solano, 2015).



Figura 4. Material con doce días de edad en el lecho de secado. (Autor)

Durante el periodo en que se desarrolló la investigación, solo se pudieron realizar dos visitas a la planta para retirar el lodo de los lechos de secado; esto debido a factores climáticos, funcionamiento irregular de la planta y de disponibilidad de vehículo en el *LabCIVCO*.

La materia prima de la investigación fue un lodo que estuvo doce días en el lecho de secado y se ingresó al horno a una temperatura de 60° Celsius durante cuatro días y medio, esto para simular una edad de secado superior donde el tiempo de secado es igual a 391.5 horas; asegurándose que con esta edad de secado se obtiene una humedad de 5.7%, donde se garantiza que las pruebas geotécnicas se pueden realizar y además que la norma con que se realizaron cumple de manera total (Solano, 2015).

El tiempo de secado del material en total duró alrededor de tres meses, de julio hasta

septiembre del 2015 en la primera recolección del material y de diciembre del 2015 hasta febrero del 2016, esto debido a que solo se contaba con un horno con capacidad para seis bandejas pequeñas, esto en el Laboratorio del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) además de esto la alta deshidratación que sufría el material hacia que el material seco fueran cantidades entre los 3 a 4 kilogramos. Al final se secaron 22 Kg de material en total.



Figura 5. Material secado el horno durante cuatro días y medio a 60° Celsius. (Autor)

Se observó que el material al salir del horno de secado, presenta un cambio en su apariencia, dando que cuando se extrajo del lecho de secado presenta una apariencia pastosa como se puede ver en la figura 5, pero al ser secado el material se aglutina debido a la evaporación del agua y toma una apariencia de agregado grueso similar a la piedra cuarta (19-25 mm). Por ello, debió ser tratado por diferentes métodos de triturado por diferentes métodos como mazo, quebrado o mazo de Proctor para ser utilizado en cada una de las normas de caracterización geotécnica.

ASTM D4318-10 Método de prueba estándar para límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos.

Esta prueba se realiza para tener una mejor identificación del suelo especialmente la parte de más fina de la muestra (arenas, limos, arcillas); este ensayo define la consistencia del suelo en función del contenido de agua que presente.

Atterberg definió estos tres límites de la siguiente manera:

- Límite de retracción o consistencia, el cual separa el estado sólido seco y semisólido.
- Límite plástico, separa el estado semisólido del plástico.
- Límite líquido el cual separa el estado plástico del semilíquido.

Además de postular estos límites, Atterberg determinó un intervalo de humedades donde la muestra de suelo puede pasar de estado semisólido a semilíquido llamando a este índice de plasticidad (González, 2002).

Equipo

- Copa de Casa Grande.
- Horno secador con temperatura uniforme por toda la cámara (110 ± 5 °C).
- Balanza calibrada con lecturas de hasta 0.01 g.
- Tamiz n°40 (0,1 mm).
- Vidrio esmerilado.

Procedimiento

- Al material salir del horno aglutinado y en fragmentos grandes, se decidió fraccionar el material mediante golpes de maso, para luego ser tamizado por la malla #40; hasta que se obtuvieron alrededor de 170 g de material pasando el tamiz antes mencionado.
- Se pesaron 100 g de material para realizar la prueba de ambos límites; al comenzar a añadir agua al material este presentó un separación total entre el agua y el suelo, formando grumos y creando una película impermeable entre las partículas de agua y el material, lo cual obligó a añadir grandes cantidades de agua para poder obtener una mezcla trabajable.
- Al realizar el ensayo en la Copa de Casagrande, el material presentaba un comportamiento variable dado que perdía humedad muy rápido y presentaba grandes variaciones en la cantidad de agua agregada en cada punto.
- El ensayo para el cálculo del límite plástico, presentó al igual que el de límite líquido inconvenientes con la humedad y

el comportamiento del material ante el agua.

ASTM D854-14 Método de prueba estándar para la gravedad específica de sólidos del suelo por picnómetro.

El dato de gravedad específica es de gran utilidad en el campo de la mecánica de suelos; que en el caso será utilizado para la caracterización granulométrica mediante uso de hidrómetro del suelo artificial en estudio.

Se define como la relación de la unidad de peso de un material dado con la unidad de peso del agua (Das, 2006).

Equipo

- 2 picnómetros 250 mL
- Termómetro precisión 0.5 °C
- Balanza calibrada con lecturas hasta de 0,01 g
- Agua destilada
- Horno secador con temperatura uniforme por toda la cámara (110 ± 5 °C).
- Bomba de vacío
- Baño maría
- Tamiz #4 (4.75 mm)

Procedimiento

- Como se mencionó en el ensayo de límites de Atterberg, el material se debe primero secar ya que su condición natural de alta humedad hace imposible la ejecución correcta del procedimiento, para posteriormente triturar, pues al salir del horno secador se encuentra aglutinado por lo que se debe moler tal como se muestra en la siguiente figura 6.
- La calibración de los picnómetros se realizó con anterioridad por los encargados del laboratorio.
- Se realizaron los pesos del picnómetro y material (100 g) para la realización de la prueba, y también se separa la cantidad de material que servirá para medir la humedad.



Figura 6. Proceso de molienda del material para ser utilizado en el ensayo de Límites de Atterberg y Gravedad Específica. (Autor)

- Cuando se agregó el material dentro de picnómetro y luego se comenzó a añadir agua, el material formó una película impermeable; lo cual originó que el material se mantuviera suspendido por el agua como se observa en la figura 7.



Figura 7. Material suspendido por el agua, al momento de llenar el picnómetro con el agua destilada. (Autor)

- Para el ensayo la solución suelo-agua se dejó reposar por 16 horas para que se formara una mezcla homogénea, pero al término del tiempo establecido aún se encontraban partículas flotando.
- Al someter las muestras a la bomba de vacío, a lo largo de las 2 horas que indica la norma que se debe aplicar el vacío siempre generó burbujas en exceso.
- Luego se colocó el picnómetro con la mezcla en un baño maría, a una temperatura de 20 °C hasta llevar la disolución a dicha temperatura, para luego obtener su respectivo peso.
- Se verificaron los pesos secados al horno y se prosiguió a la realización de los cálculos.

- Es importante acotar que al momento de realizar el secado del material de los picnómetros, parte de este fue quemado en el horno, lo que confirma la presencia de materia orgánica en la muestra seleccionada para el ensayo, tal como se muestra en la siguiente figura 8.



Figura 8. Material quemado en el horno, al calcular peso seco en gravedad específica. (Autor)

ASTM D422 Método de prueba estándar para análisis de tamaño de partículas de suelo.

Esta prueba también recibe el nombre de granulometría mediante hidrómetro, esta se basa en el principio de sedimentación de los granos de suelo en agua, dado que estos se dispersan y depositan a diferentes velocidades, dependiendo de su forma tamaño, peso y de la viscosidad del agua (Das, 2006).

Este ensayo constituyó un reto importante específicamente en su procedimiento debido a que el suelo a utilizado presenta alto contenido de material orgánico, además de readecuar ciertos pasos de la norma para que esta pudiera ser aplicable en la investigación.

Se decidió solo realizar el ensayo de análisis granulométrico mediante hidrómetro, ya que al material al salir aglutinado del horno, el proceso de fragmentación no aseguraba que las partículas regresaran a su estado inicial, que serían partículas muy pequeñas menores a 75 μm ; debido a que se habla de un lodo orgánico proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales. Por este motivo, si se realizó el análisis granulométrico por medio de malla se

tendría una granulometría no confiable, ya que se estarían tomando como partículas grumos o fragmentos aglutinados.

Equipo

- Balanza calibrada con lecturas hasta de 0,01 g
- Agitador mecánico con una velocidad no menor 10000 rpm sin carga.
- Hidrómetro 151H, ver figura 9.



Figura 9. Hidrómetro 151H utilizado en el ensayo de análisis granulométrico. (Autor)

- Termómetro precisión 0.5 °C.
- Cilindro de sedimentación con marca de volumen 1000 ml.
- Malla #200.
- Agente dispersador hexametáfosfato de sodio 40g.

Procedimiento

- El material secado al horno, se tamizó por la malla #200 hasta obtener 100 g de material pasando dicho tamiz.
- Se prepararon 1000 ml de solución con hexametáfosfato de sodio (40 g/l), esto para poder tomar la corrección del hidrómetro por compuesto, al ser el hidrómetro 151H se sumerge en la disolución a temperatura constante; se toma la respectiva lectura y se le resta 1; dando como resultado el factor de corrección, como se muestra en la figura 10.



Figura 10. Izquierda hidrómetro 151H sumergido en agua, derecha mezcla de disolución de hexametáfosfato de sodio. (Autor)

- Se pesaron 15 g del mismo material pasando la malla #200, esto para el cálculo de la humedad higroscópica.
- Se realizó el pesaje de 50 g de material pasando la malla #200; para colocarse en un beaker de 250 ml y cubrirse con 125 ml de disolución de agente dispersante; dejándose reposar por 16 horas, como se muestra en la figura 11.



Figura 11. Muestra de 50 g de material disuelto en 125 ml de agente dispersador, en reposo por 16 horas. (Autor)

- Después de las 16 horas de reposo, el material se introduce a la mezcladora (ver figura 12), para ser agitado por 1 min y ser devuelto al sedimentador y completar el volumen de 1000 ml.



Figura 12. Mezclador utilizado en el ensayo de granulometría por hidrómetro. (Autor)

- Se terminó el proceso de agitación; poniendo un tapón hermético en la boca del cilindro y agitando esté 60 veces por minuto, para luego dejar reposar la mezcla.
- Se tomaron las lecturas del hidrómetro a los:
 - 2 min
 - 5 min
 - 15 min
 - 30 min
 - 250 min
 - 1440 min
 Tomando la temperatura en cada una de ellas, como se muestra en la figura 13.
- Realizando las primeras 3 lecturas; la cantidad de veces hasta que el dato obtenido en las tres no varié en una unidad con respecto al anterior, hecho este ajuste se prosigue con las otras medidas.



Figura 13. Disolución de material al momento de realizar las mediciones del hidrómetro. (Autor)

ASTM D5084-10 Métodos de prueba estándar para la medición de la conductividad hidráulica saturada de materiales porosos usando un permeámetro.

Este ensayo se realiza con el objetivo de obtener la conductividad hidráulica “ k ”, la cual es la facilidad con la que el agua circula por los huecos o poros interconectados de un estrato de suelo en estudio (González, 2002).

Para la realización de esta prueba se modificaron ciertas partes del procedimiento, además de utilizar equipo no mencionado en la norma; el método seleccionado para la ejecución del ensayo es el Método B con cabeza de elevación de agua de descarga constante. En este ensayo se presentó un atraso considerable en la investigación ya que el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción el permeámetro se encontraba realizando ensayos para vena de servicios, por lo cual no se tenía la disponibilidad inmediata del mismo.

Equipo

- Balanza calibrada con lecturas hasta de 0,01 g.
- Pie de rey.
- Permeámetro.
- Mazo de Proctor modificado.

- Aro superior del molde de Proctor modificado.
- Manguera delgada de 1.5 m de longitud.
- Pila de agua.



Figura 14. Permeámetro utilizado para el ensayo de permeabilidad. (Autor)

Procedimiento

- Se inició realizando una verificación de que el permeámetro se encontrara en perfectas condiciones, verificando el estado de los accesorios y empaques, como se muestra en la figura 14.
- Se tomaron las medidas de altura y diámetro del permeámetro utilizando el pie de rey, cada medida se realizó tres veces y se utilizó como valor el promedio de estas.
- Se tomó una muestra del material a utilizar para verificar el contenido de humedad con el que se encuentra, se ingresa al horno a 110 °C por 24 horas.
- Con los datos de humedad del material, se procede a realizar una corrección de humedad del material; para esto se tomó la humedad y densidad humedad máxima de un ensayo de Proctor modificado suministrado por una investigación realizada al mismo material (Solano, 2015)
- Se realizó el moldeo del material en el permeámetro tal como se hace en el ensayo de Proctor modificado, al finalizar el moldeo se procedió a tomar la lectura del peso del molde más el material, tal como se muestra en la figura 15.



Figura 15. Pesaje del permeámetro más el material moldeado. (Autor)

- Luego el material moldeado se debe saturar, por lo que se sumergió en una pila de agua por 24 horas, como muestra la imagen 16, este tiempo no asegura una saturación total de la muestra pero por motivos de tiempo y de disponibilidad de la pila se decidió utilizar este tiempo de saturación.



Figura 16. Permeámetro mientras se saturaba en la pila de agua por 24 horas. (Autor)

- Al terminar la saturación se debe verificar que no quede agua dentro del permeámetro, por lo que se volcó el dispositivo alrededor de 3 horas para procurar extraer toda el agua que se encuentra dentro. Este paso es el menos preciso, dado que no se cuenta con una

bomba de aire que asegure el escurrimiento total del material.

- La parte final es el montaje de la prueba por lo que, se dispuso de una mesa pequeña para colocar el permeámetro y se colocó una manguera sujeta con una prensa tratando que esta se encontrara lo más vertical posible, y un recipiente para recolectar el agua que sale de permeámetro.



Figura 17. Montaje de la prueba de permeabilidad. (Autor)

- Se realizó la respectiva purga, para verificar que el agua fluía a través del material.
- Se procedió a llenar la manguera donde se estipuló la cabeza total de agua a 99,7 cm con respecto al nivel donde se apoya el permeámetro. En este paso se tuvieron problemas, ya que al agregar agua a la manguera aparecieron burbujas de aire que salían del recipiente por lo que se tuvo que esperar que estas se estabilizaran.
- El dato de lectura final tuvo que ser tomado a la media hora después de la estabilización de las burbujas, pues la columna de agua no bajaba con una velocidad constante.
- Al finalizar la prueba y la toma de la lectura final, la manguera y el

permeámetro se dejaron 24 horas más y la lectura no variaba.

- Se realizaron los respectivos cálculos para obtener la conductividad hidráulica.

Diseño del Modelo Hidrogeológico

Al finalizar la caracterización geotécnica del material en estudio, se procede a realizar el modelo que será utilizado para simular las precipitaciones requeridas en este ensayo.

Como primera opción, se realizó un análisis adimensional de las variables establecidas, para tratar de obtener la premisa de que cualquier fenómeno se puede describir a través de una ecuación dimensionalmente constante, la cual deberá reunir todas las variables que controlan el fenómeno. (Gomez, 2012).

El modelo hidrológico pretende simular las condiciones reales del material en estudio, utilizando una compactación determinada con un ángulo de inclinación variable y sometido a diferentes condiciones de precipitación. En la investigación se definieron como variables que controlan el fenómeno la intensidad (mm/hr), Densidad del material (kg/m^3) y el espesor del estrato de suelo (m); previamente se descartó el ángulo de inclinación debido a que es una variable adimensional.

Al tratar de demostrar la dependencia de las variables y someter estas al teorema PI de Buckingham, se obtiene una ecuación dimensionalmente no homogénea; ya que no puede ser reducida como un conjunto de productos adimensionales. Al descartar realizar una simplificación apropiada de la condición a simular se decidió buscar aparatos o dispositivos que tengan alguna relación con estudios de hidrología y erosión; por ello, se tomó como modelo el sistema avanzado de hidrología ambiental S12MKII de la marca Armfield que se muestra en la figura 18, ya que dentro de la ficha técnica menciona como posibilidades de investigación el transporte de sedimentos, movimiento de carga sólida, socavación y erosión.

Dicho sistema de hidrología sirvió como referencia de las dimensiones y funcionamiento de un dispositivo de este tipo, además de los accesorios que deberá tener como por ejemplo manómetros, fluxómetros y el mecanismo de inclinación además de la colocación de los aspersores y agujeros



Figura 18. Sistema de hidrología ambiental Armfield S12MKII. (discoverarmfield.com)

Para la fabricación de nuestro simulador se decidió construir un marco de acero elaborado con angulares que se encontraban sin ningún uso en el *LabCIVCO*, además de una bandeja construida en acrílico para así poder verificar el movimiento del agua a través del estrato y se debía seleccionar la cantidad y modelo de aspersores a utilizar; para la ubicación del mismo se utilizó el sótano del *LabCIVCO* por la facilidad de que en este se encuentra una pila con desagüe y espacio disponible para la instalación y preparación de los ensayos necesarios para medir la erosión.

El marco es construido con angulares con agujeros a cada 2 cm esto para que pueda ser ajustable en altura, se diseñó con una altura de 1,9 m (ver figura 19), ya que se debe tener en cuenta la limitación de que existe un entresuelo sobre el por lo que dicha medida en la altura máxima, las demás medidas se pueden encontrar en los planos de taller (ver apéndice 2).



Figura 19. Marco de acero para el simulador hidrológico. (Autor)

Para el diseño de la bandeja que utilizó el simulador hidrológico, se debió tomar en cuenta que esta pudiera ser útil para diferentes espesores de estrato y que se pudiera ver el movimiento del agua a través del mismo, la selección del área de exposición del suelo al agua se relacionó con el concepto de precipitación, ya que las unidades de medida de (mm/hr) se deben a una lámina de agua por metro cuadrado, pero en el caso debido a la falta de angulares y de espacio se decidió realizar una bandeja con área de exposición (1x0.5 m) y con la opción de colocar estratos a 10 cm, 20 cm y 30 cm como se muestra en la figura 20, ver planos de taller en apéndice 2.



Figura 20. Bandeja fabricada para el simulador hidrogeológico. (Autor)

La bandeja fue elaborada con una lámina de acrílico transparente (1.22x2.44 m) con un espesor de 5 mm; fue cortada con base en planos de taller mediante una cortadora laser y pegada utilizando cloroformo, dicha bandeja reposa en una tabla de madera contrachapa unida mediante un cable de acero a un tornillo ajustable que inclinara la bandeja según el ángulo deseado.

Para poder suministrar agua al simulador solo se contaba con disponibilidad del agua de una tubería de 3 pulgadas conectada a la red de suministro del *LabCIVCO*, esto es un aspecto importante de mencionar ya en un modelo de mayor precisión el suministro de agua debiera ser mediante una bomba conectada a un reservorio o tanque que asegure el flujo constante al sistema. Para tratar de controlar las variaciones de caudal y de presión, se decidió utilizar un fluxómetro ADDO para verificar si existen cambios importantes en el caudal que afecten el uso de los aspersores utilizados; además, se colocó un manómetro de 100 psi debido a que la mayoría de aspersores en el mercado funcionan según la presión presente en el sistema de riego o en nuestro caso la presión que tengan las tuberías de nuestro simulador ambos se muestran en la figura 21, los planos de taller del sistema de tuberías se pueden ver en el (ver apéndice 2).



Figura 21. Manómetro de 100 psi y fluxómetro utilizado en el simulador hidrogeológico. (Autor)

La selección de aspersor fue uno de los aspectos que más tiempo tomó ya que primero se debió saber la cantidad necesaria para cubrir la bandeja con una cantidad de agua que simulara de mejor manera una lluvia, para determinar el tipo de aspersor idóneo se tomaron en cuenta el rango de presiones que puede suministrar la red, tamaño de gota y la lámina de agua que pueda generar en nuestra bandeja. Como primera opción, se colocó solo un aspersor en el centro del simulador hidrológico, para dicha prueba se compraron dos aspersores de corto alcance de un rango de (3-6 m), los dos modelos probados fueron Micro Aspersor Spinet (70 l/hr) y Micro Aspersor Gyronet LR (40 l/hr), los cuales se muestran en la figura 22; pero ninguno de los aspersores mencionados fueron adecuados ya que al expulsar el agua lo hacia los lados y no quedaba cubierta el área del centro



Figura 22. Aspersor Gyronet LR 40 l/hr (izq) y Aspersor Spinnet 70 l/hr (der). (Autor)

Debido a estos inconvenientes con la selección del aspersor, se debió buscar un aspersor que cumpliera con los requerimientos de solo esparcir agua en un solo ángulo fijo, no como los anteriores que lo hacían a 360°, el nuevo aspersor debía cumplir también con un tamaño de gota adecuada por lo que se seleccionó la serie VAN de la marca *RainBird* (Anexo 1) ya que según criterio de experto es el más adecuado según tamaño de gota y ángulo fijo, los cuales se muestran en la figura 23; además de ser el único con disponibilidad inmediata en el país (K. Villagra, comunicación personal, 20 noviembre 2015); los representantes de dicha marca en el país es la compañía Durman para lo cual se pidió asesoría al departamento de riego de dicha entidad por lo que se recomendó el ubicar 4 aspersores uno en cada esquina del aparato para una mejor cobertura de la bandeja y poder establecer el ángulo de aspersión (B. Cubero, comunicación personal, 24 noviembre 2015).



Figura 23. Aspersor utilizado en el simulador hidrogeológico 6 series VANmarca RainBird. (Autor)

Para la calibración del simulador hidrogeológico se realizó una correlación entre la presión del agua en el sistema y la intensidad de

lluvia que pueden simular los aspersores utilizados; para realizar esta calibración se utilizaron 2 probetas de 1000 mL ubicadas en ambos extremos de la bandeja, las cuales se exponían al agua expulsada por los aspersores a períodos de 15 minutos, pues este fue el tiempo máximo que se consideró que podía mantenerse constante una intensidad (K. Villagra, comunicación personal, 20 noviembre 2015); el cálculo de la intensidad relaciona el área transversal de cada probeta y la cantidad de líquido recolectado durante el ensayo además de conversiones de minutos a horas esto para cada probeta utilizada en el ensayo, luego se promedia el valor de intensidad obtenido en cada probeta a una intensidad determinada, las intensidades varían en 0,1 hasta llegar a 0,7 kg/cm².

Es importante mencionar que la impermeabilización de las ranuras de la bandeja se realizó con plastilina, ya que este material asegura que el agua no derrame por otros lugares que no sean los de interés y aportan más unión a la bandeja; además, se añade su bajo costo y fácil trabajabilidad.

Al momento de iniciar con la compactación del material en la bandeja del simulador se determinó que no se podía reproducir la densidad humedad máxima que se tiene del material; esto debido a que el material de fabricación no soportaría los golpes del maso de compactación; por ello, se debe de tener en cuenta como gran limitación el no poder simular la densidad requerida.

Por ende, se decidió continuar con el proyecto y se propuso un método de compactación aproximado utilizando un mazo de madera con un peso aproximado de 1.5 kg; agregando material en capas de aproximadamente 2.5 cm compactando con 8 impactos por cada capa de material agregado como se muestra en la figura 24.



Figura 24. Proceso de compactación mediante el mazo artesanal. (Autor)

Antes de realizar los ensayos requeridos para la conclusión del proyecto y de este modo poder cuantificar la erosión del material; se realizó una prueba en el simulador hidrogeológico esto realizando los pasos de impermeabilización de las ranuras de la bandeja y compactación del material pero dejando la inclinación de la bandeja con pendiente cero, al someter el material a la precipitación seleccionada de 59,20 mm/hr con una presión en el sistema de 0,5 kg/cm² durante 15 minutos, se produjo un fallo en el pegamento de las láminas de bandeja tal como se muestra en la figura 25, dicha prueba cumplió a cabalidad con evidenciar las mejoras que se debían realizar al simulador por lo que se ajustó el ángulo de los aspersores y se reforzó la bandeja con cinta adhesiva transparente y silicón impermeabilizante, además de un sistema de tuberías de PVC que sirve para evitar que la bandeja se abra debido a la presión del material.



Figura 25. Falla de la bandeja del simulador hidrogeológico. (Autor)

Luego de realizar las correcciones correspondientes, se procede a tomar las medidas de los ángulos con que se realizarían los ensayos de erosión dichas pendiente se establecieron previamente (H:V) como:

- 1:1
- 1.5:1
- 2:1

Se seleccionaron estas pendientes debido a que son las más utilizadas en labores de campo, especialmente al momento de darle inclinaciones a taludes, para tener medidas reales de los ángulos primero, se verificó la longitud de la tabla donde reposa la bandeja para luego con una manguera de nivel verificar su nivel en relación a la zona de recogida del ángulo, para verificar los ángulos se realizó mediante un transportador de madera y la manguera de nivel, los cuales se fijan por medio de una cuerda que se amarró al simulador para saber en todo momento dicha inclinación como se muestra en la figura 26.

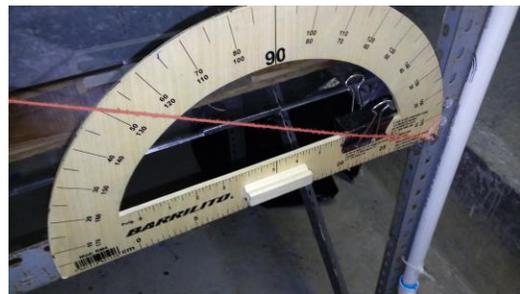


Figura 26. Medición de ángulos a utilizar en el simulador hidrogeológico. (Autor)

Al momento de elevar la bandeja a las pendientes establecidas previamente, se presentó el inconveniente de que al estar el simulador hidrogeológico ubicado en el sótano del LabCIVCO el mecanismo de levantamiento tenía inconvenientes, pues no se podía elevar a las inclinaciones establecidas; por lo que se decide realizar los ensayos con la inclinación mayor que se puede lograr dentro del sótano la cual es de 18.94°, ya que considerar mover el simulador implicaba realizar las calibraciones nuevamente además de ubicar una pileta con desagüe, pero es importante acotar que el simulador cumple a la perfección con diferentes inclinaciones en otro lugar que no tengan limitaciones de espacio. ▬

Al momento de realizar las fallas se establece que la cantidad de material para llenar la bandeja es de 9,66 kg, ya que solo se utilizará la mitad de la bandeja esto se debe a la escasez de material proveniente de la planta, se agregará 2257,5 mL de agua tomados del porcentaje de humedad de la densidad humedad máxima tomada del Proctor como se muestra en la figura 27. El material será sometido a un ensayo de 15 minutos de duración a una intensidad de 59.20 mm/hr con la inclinación máxima posible de 18.94°.



Figura 27. Proceso de homogenización e hidratación del material, antes de realizar el ensayo de erosión. (Autor)

En el primer ensayo donde el material no contenía ningún porcentaje de cemento solo se procedió a realizar una homogenización del material para luego añadir el agua establecida para lograr una mezcla homogénea, la cual será utilizada en el simulador hidrogeológico, como se muestra en la figura 28.



Figura 28. Material homogenizado con la humedad deseada. (Autor)

Después de realizar la hidratación del material, se trasladó hasta el sótano del LabCIVCO siempre tratando de disminuir las

pérdidas de humedad por lo que se utiliza un plástico sobre la bandeja; al llegar ahí se procede a compactar el material en 4 capas de 2.5 cm hasta llenar los 10 cm de espesor del estrato, como se muestra en la figura 29.



Figura 29. Colocación y compactación del material en la bandeja del simulador hidrogeológico. (Autor)

Este mismo proceso se repite al agregar los diferentes contenidos de cemento de:

- 10% (0.966 kg)
- 20% (1.932 kg)
- 30% (2,898 kg)

Después del proceso de compactación, el material se deja reposar por 16 horas; esto para asegurarse de una correcta fragua del cemento y un secado aproximado al que tendría en campo el suelo artificial (ver figura 30).



Figura 30. Material compactado y en reposo por 16 horas antes del ensayo. (Autor)

Al terminar el tiempo aproximado de fragua y secado se procede a elevar la bandeja al ángulo de inclinación establecido. Antes de permitir la entrada de agua al sistema se debe fijar la presión requerida, por lo que se debe cubrir con un plástico el material hasta que la

presión se tenga relativamente constante, ya que al estar conectado a la red de suministro de agua del Tecnológico de Costa Rica pudiera tener pequeñas variantes. Por tanto, el ensayo inicia al momento de que se estabilice la presión y se destape el material como lo muestra la figura 31.



Figura 31. Bandeja cubierta mientras se estabiliza la presión en el sistema.

Al iniciar el ensayo se toma el tiempo desde que se descubre el material y se estabiliza la presión hasta que se cumplan los 15 minutos de la precipitación establecida; durante este tiempo se controla que la presión no varíe en más de 0.1 kg/cm^2 y se toman mediciones del caudal en diferentes tiempos durante el ensayo (ver figura 32).

El ensayo de erosión consiste en recolectar la escorrentía superficial y material arrastrado que presenta el suelo en una cuneta elaborada con un tubo de 7,62 cm de diámetro, además tiene como función contener en el agua de la escorrentía los sedimentos o fragmentos de material que se erosionan durante el ensayo, además se realiza la medición de infiltración que presenta el suelo en su estado natural y la afectación que tiene al añadir cemento al mismo esto se realiza por medio de una bandeja de metal ubicada bajo el estrato donde se retiene el agua infiltrada, esto se debe gracias a 5 agujeros que tiene el fondo falso de la bandeja, ya que es mediante estos que el agua puede ser retenida en la bandeja antes mencionada.

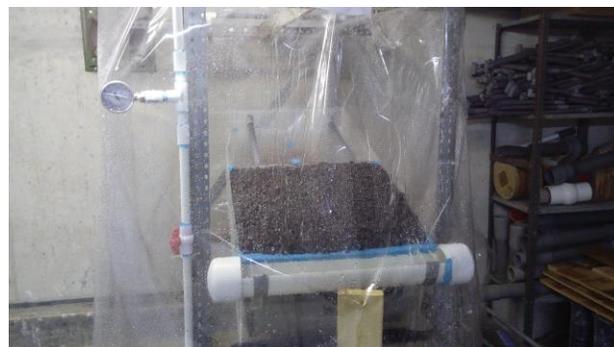


Figura 32. Ejecución del ensayo de erosión en el simulador hidrogeológico. (Autor)

Al finalizar el ensayo se volvió a colocar la bandeja en posición horizontal, para luego abrir un extremo de la cuneta y colocar una malla #200 para retener el material que se erosionó durante el ensayo; debajo de la malla se colocó un recipiente de aluminio donde se retiene el líquido que representa la escorrentía del material en el ensayo, este luego se pasa a una probeta de 1000 ml para su respectiva medición.

Para la medición de la infiltración se debió retirar todo el material colocado en la bandeja, para proceder a levantar el fondo falso y, de este modo, retirar la bandeja que contiene el agua infiltrada, esta luego se pasa al igual que el agua de escorrentía a una probeta de 1000 ml para su respectiva medición.

Con el material retenido en la malla #200 se procede a pasar el material retenido en la malla para luego proceder a tomar su peso seco, esto se realiza lavando la malla y agregando el material con un poco de agua del lavado a un recipiente que previamente se conoce su peso; luego se ingresa por 24 horas a 110° C para luego realizar la toma del peso seco.



Figura 33. Toma de peso seco del material erosionado. (Autor)

Al terminar cada uno de los ensayos se procedió al análisis y tabulación de los datos obtenidos para luego determinar el potencial de erosión del suelo artificial en estudio, tratando de relacionar las características geotécnicas y sacando provecho del simulador hidrogeológico elaborado para dicho estudio.

Resultados

Límites de Atterberg

Al tratar con sedimentos de partículas finas de desecho se debe tomar en cuenta que se desconoce el comportamiento que este puede tener al añadir agua a la disolución, al realizar el ensayo los datos mostrados en el cuadro 1, presentan variaciones considerables para obtener la consistencia debida en los puntos correspondientes.

Según valores teóricos para lodos el Límite líquido (LL) es de un valor de 31, Límite plástico (LP) de 25 y un Índice de plasticidad (IP) de 6

(Bobba, 2005); para el país se desarrollaron ensayos en diferentes plantas de tratamiento en Puntarenas obtenido LL: 51, LP: 37 Y IP: 14; además de ensayos en Heredia donde los valores son de LL: 104, LP: 90 y IP: 14 (Rivera, 2012). Para este caso se está ante un material no plástico y con comportamiento variable a la humedad, teniendo la capacidad de absorber y liberar agua situación que puede ser retribuida a la presencia de minerales como aluminio y sílice, presentes comúnmente en las arcillas.

CUADRO 1. DATOS OBTENIDOS PARA EL CÁLCULO DEL LÍMITE LÍQUIDO					
Punto	1	2	3	4	5
# Bandeja	22	46	58	34	17
M _B (g)	6.766	6.798	6.619	6.642	6.695
M _H +M _B (g)	14.949	17.544	13.471	14.589	14.541
M _s +M _B (g)	10.403	11.480	9.607	10.032	10.009
M _A (g)	4.546	6.064	3.864	4.557	4.532
M _s (g)	3.637	4.682	2.988	3.390	3.314
%H	43,79	53,03	40,46	45,58	45,36
# Golpes	38	31	29	22	18

Fuente. Datos del ensayo Límites de Consistencia. (Autor)

Curva Granulométrica

Se presentan a continuación los datos de la curva granulométrica para el lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, solo se analiza la parte más fina, ya que el aglutinamiento del material

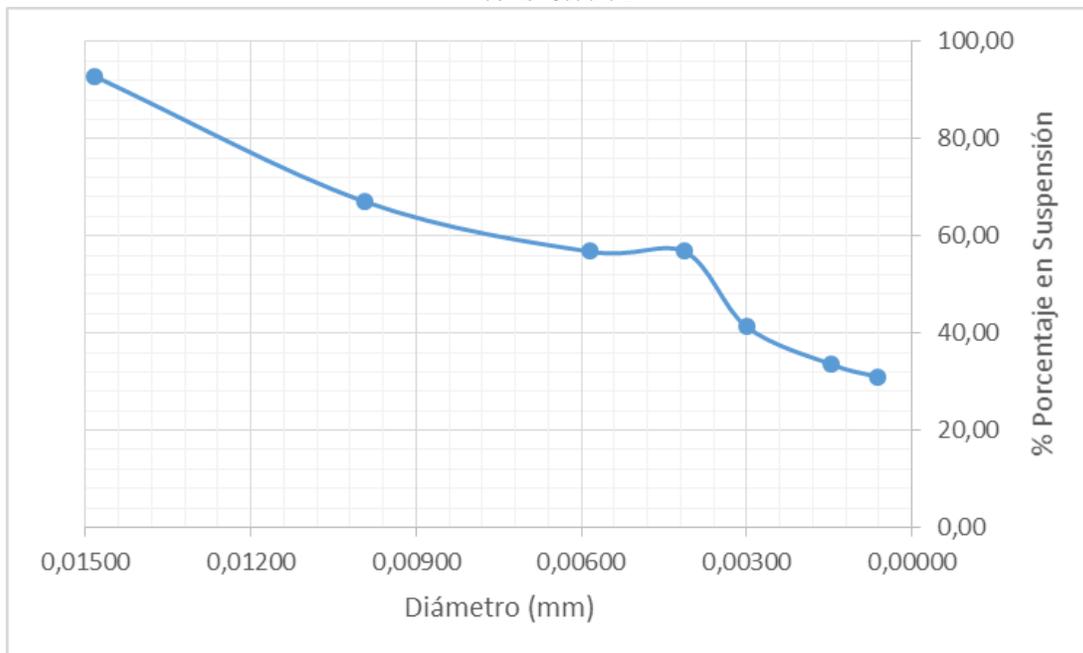
Puede causar error a la curva, lo anterior basado en el método estándar ASTM D422-63 por método del hidrómetro 151H.

CUADRO 2. DATOS OBTENIDOS PARA DETERMINAR CURVA GRANULOMÉTRICA		
Tiempo	% en Suspensión	Diámetro
2 min	92,939	0,01484
5 min	67,122	0,00994
15 min	56,796	0,00585
30 min	56,796	0,00413
60 min	41,306	0,00300
250 min	33,561	0,00146
1440 min	30,980	0,00061

Fuente. Datos de ensayo Granulometría por Hidrómetro. (Autor)

Gráfico 1. Curva Granulométrica de muestra de lodo *Planta de Tratamiento las Palmas*

Fuente. Cuadro 2



Gravedad Específica

El valor obtenido de la gravedad específica es determinado mediante el método estándar ASTM D854, se realizó para dos muestra iguales del lodo en estudio esto para obtener un valor promedio.

Los datos obtenidos en el cuadro 3 son similares a los obtenidos para lodos de plantas de tratamiento de 1,71 (Bobba, 2005), por lo que se pudiera clasificar según el valor obtenido como una turba.

CUADRO 3. VALORES DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL LODO EN ESTUDIO	
Muestra	G _s
Picnómetro 1	1,797
Picnómetro 2	1,776
Promedio	1,787

Fuente. Datos ensayo Gravedad Específica. (Autor)

Conductividad Hidráulica

Este valor se compara con valores teóricos de permeabilidad donde se pudiera clasificar en términos de permeabilidad como una arcilla de baja plasticidad (CL) pues el valor de “k” ronda entre (10⁻⁵-10⁻⁸) (González, 2002).

El dato obtenido de permeabilidad para el lodo de la planta de tratamiento de aguas domésticas del residencial las palmas es de $k = 1.12 \times 10^{-9}$ m/s, este dato obtenido según el método estándar ASTM D5084-10 (carga hidráulica variable).

$$k = \frac{a * L}{A * \Delta t} \ln \left(\frac{h1}{h2} \right)$$

$$k = \frac{2,95 \times 10^{-5} m^2 * 0,158 m}{0,0081 m^2 * 2280,75 s} \ln \left(\frac{0,997 m}{0,992 m} \right)$$

$$k = 1,12 \times 10^{-9} m/s$$

k: Conductividad hidráulica (m/s).

a: Área transversal de la manguera del permeámetro (m²)

L: longitud desde la base del permeámetro hasta la parte superior donde se conecta la manguera (m).

Δt: intervalo de tiempo que varía la columna de agua en la manguera del permeámetro (s).

h1: lectura inicial de la columna de agua en la manguera (m)

h2: lectura final de la columna de agua en la manguera (m).

Proctor Estándar

El ensayo de Proctor se realizó en el Laboratorio de Materiales del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, ya que también se realizaba una investigación en conjunto bajo la misma guía del Doctor Rafael Baltodano Goulding, por lo que a continuación se presentan los datos de dicho ensayo realizado en según el método estándar ASTM. D698.

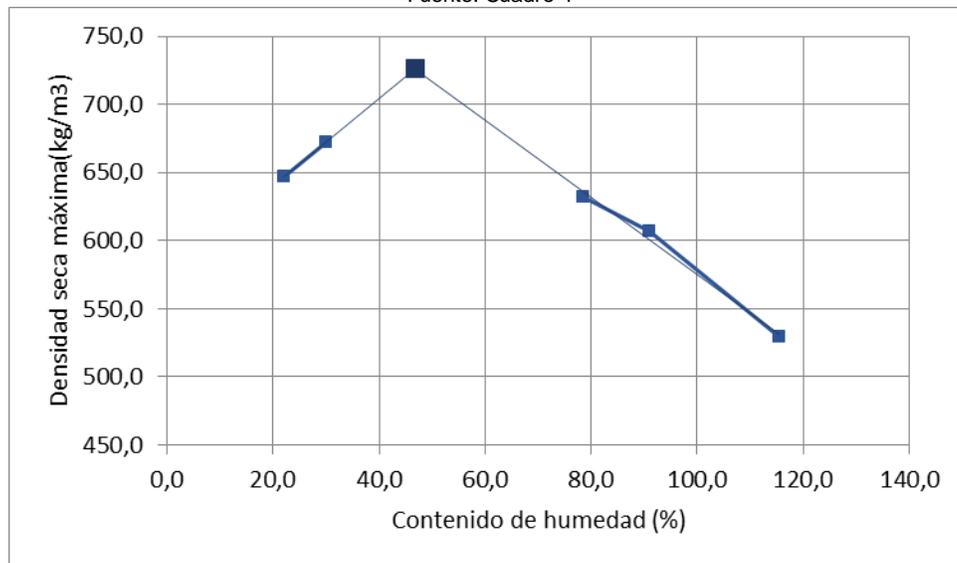
Se realizaron cinco puntos para la edad de lodo utilizada en este ensayo, se presentaron problemas al homogenizar y humedecer el material debido a la presencia de grumos.

CUADRO 4. RESULTADOS DE COMPACTACIÓN DE MUESTRA DE SUELO		
Condición	Humedad (%)	Densidad Seca (kg/m ³)
Rama Seca	22,00	646,70
	30,00	672,40
Rama Húmeda	78,60	631,80
	90,90	606,60
	115,40	529,30

Fuente. Ensayo de Proctor Estandar. (Solano, 2015)

Gráfico 2. Curva de Compactación de la Muestra de Suelo Artificial

Fuente. Cuadro 4



Luego de realizar los diferentes puntos se obtuvo la humedad óptima, lo cual implica que es la cantidad de agua que fue añadida para la modelación de los moldes de permeabilidad y la

aproximación realizada en el simulador hidrogeológico, para la muestra de lodo utilizada

la humedad optima es de **46,74 %** para lograr obtener una densidad seca máxima **725,98 kg/m³**.

Ensayos Caracterización Ambiental

Se realiza una caracterización ambiental del material, esto para corroborar que la utilización de este nuevo suelo artificial no atente con la salud pública ni afecte el entorno donde eventualmente se utilizaría, por lo cual se evaluará como un suelo apto para fines agrícolas, repercutiendo esto en una exigencia mayor de los límites permitidos para los parámetros medidos; debido a que en teoría se utilizará para el cultivo de alimentos para el consumo humano

CUADRO 5. RESUMEN DE ENSAYOS AMBIENTALES APLICADOS AL LODO EN ESTUDIO			
Parámetro	Ensayo	Muestra	Límites Uso Agrícola
Grado de contaminación	DBO (mg/L)	284,00	100,00
	DQO (mg/L)	568,00	200,00
Contenido de nutrientes (mg/L)	Nitrato	0,70	5,00
	Nitrito	0,00	5,00
	Nitrógeno amoniacal	0,59	5,00
	Fósforo	0,15	5,00
Índice	pH	5,71	5,00
	Contenido de humedad (%)	5,67	60,00
	Contenido de materia orgánica (%)	66,37	60,00

Fuente. (Solano, 2015)

Calibración del Simulador Hidrogeológico

La calibración obtenida muestra las intensidades que se pueden obtener en nuestro simulador hidrogeológico, esto tomando la relación de la presión y el caudal que entra en el sistema, con

la que se obtiene diferentes áreas de cobertura por los aspersores, se obtienen de volumen recolectado y de intensidad para los valores de presión que varían en $0,1 \text{ kg/cm}^2$.

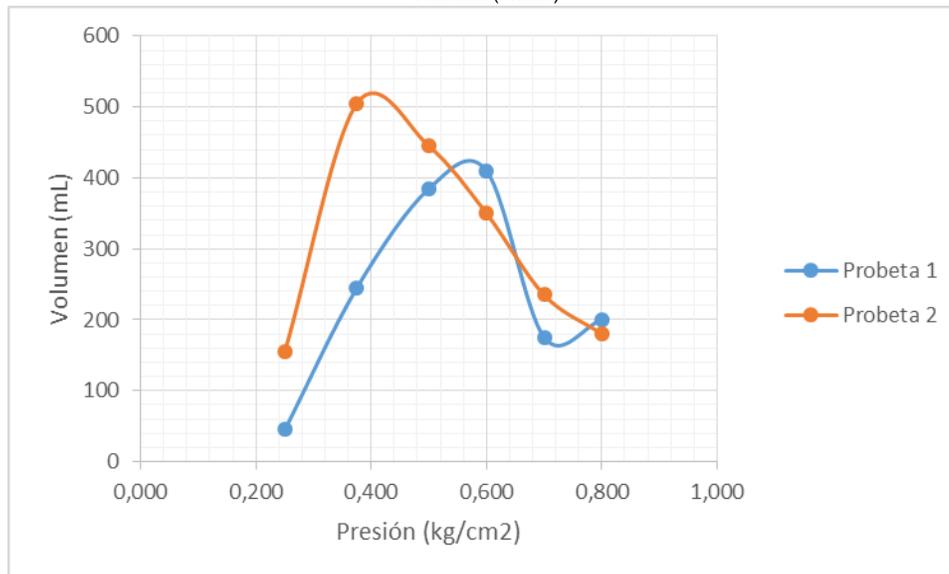
La intensidad debe ser considerable en relación a la magnitud (cantidad de agua caída por evento) y tamaño de gota (al momento de impactar contra el suelo) sobre la bandeja, esto para asegurar un fenómeno de intensidad capaz de producir erosión.

CUADRO 6. VOLUMEN RECOLECTADO EN CADA PROBETA DURANTE LA CALIBRACIÓN DEL SIMULADOR		
Presión (kg/cm ²)	Vol. Probeta 1 (mL)	Vol. Probeta 2 (mL)
0,250	45,0	155,0
0,375	245,0	505,0
0,500	385,0	445,0
0,600	410,0	350,0
0,700	175,0	235,0
0,800	200,0	180,0

Fuente. Ensayo de Calibración. (Autor)

Gráfico 3. Volumen Recolectado en Función de la Presión del Sistema

Fuente. (Autor)

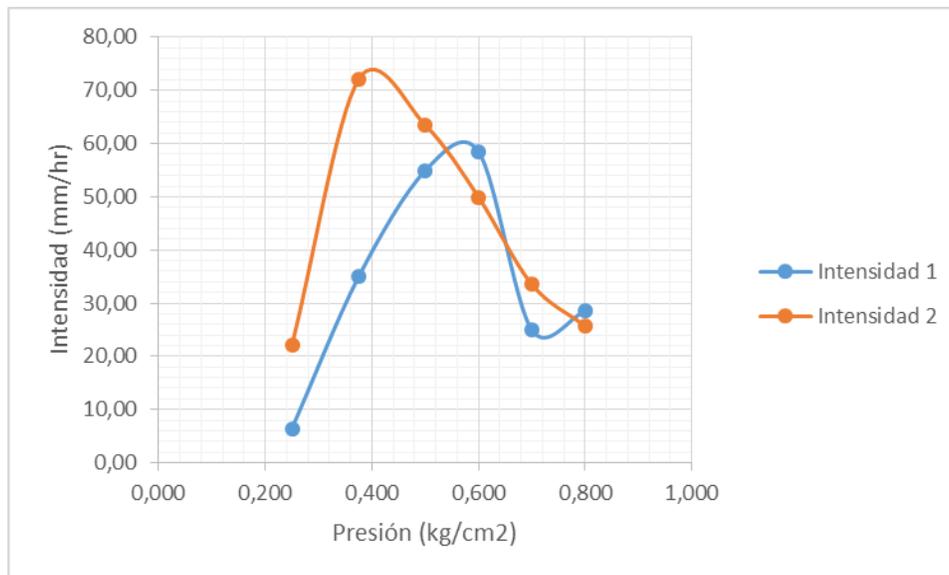


CUADRO 7. INTENSIDAD DE LLUVIA EN EL SIMULADOR EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN DEL SISTEMA		
Presión (kg/cm ²)	Intensidad 1 (mm/hr)	Intensidad 2 (mm/hr)
0,250	6,42	22,11
0,375	34,95	72,04
0,500	54,92	63,48
0,600	58,49	49,93
0,700	24,97	33,52
0,800	28,53	25,68

Fuente. Ensayo de Calibración. (Autor)

Gráfico 4. Intensidad del Simulador Hidrogeológico en Función de la Presión Hidráulica del Sistema

Fuente. (Autor)



Ensayos de Erosión en el Simulador Hidrogeológico

Los ensayos realizados en el simulador hidrogeológico tuvieron una duración de 15 minutos, con una intensidad de **59,20 mm/hr**, con una presión en el sistema de 0,5 kg/cm².

El material arrastrado hacia la cuneta en la base de la bandeja se considera como la erosión provocada por la intensidad utilizada; el líquido contenido en la cuneta se toma como la escorrentía y lo contenido en bandeja bajo el piso falso de la bandeja es la infiltración que presenta un estrato de 10 cm de espesor.

El ángulo inclinación de la bandeja, el cual representa el de un talud es de 18,94°, los datos obtenidos durante los ensayos del material en su estado inalterado y agregando cemento se encuentra en el cuadro 8.

CUADRO 8. DATOS DE EROSIÓN, INFILTRACIÓN Y ESCORRENTÍA OBTENIDOS DEL ENSAYO DE EROSIÓN							
Material (kg)	Cemento (kg)	Caudal Promedio (l/s)	Erosión (g)	Infiltración (ml)	Escorrentía (ml)	Infiltración (%)	Escorrentía (%)
9,660	0,000	0,105	2,110	5550,000	735,000	88,300	11,700
9,660	0,966	0,102	0,660	910,000	845,000	51,900	48,100
9,660	1,932	0,097	0,430	275,000	665,000	29,300	70,700
9,660	2,898	0,095	0,310	1255,000	835,000	60,000	40,000

Fuente. Ensayo de Erosión. (Autor)

Gráfico 5. Variación de la Erosión Respecto al Cemento Añadido

Fuente. Cuadro 8

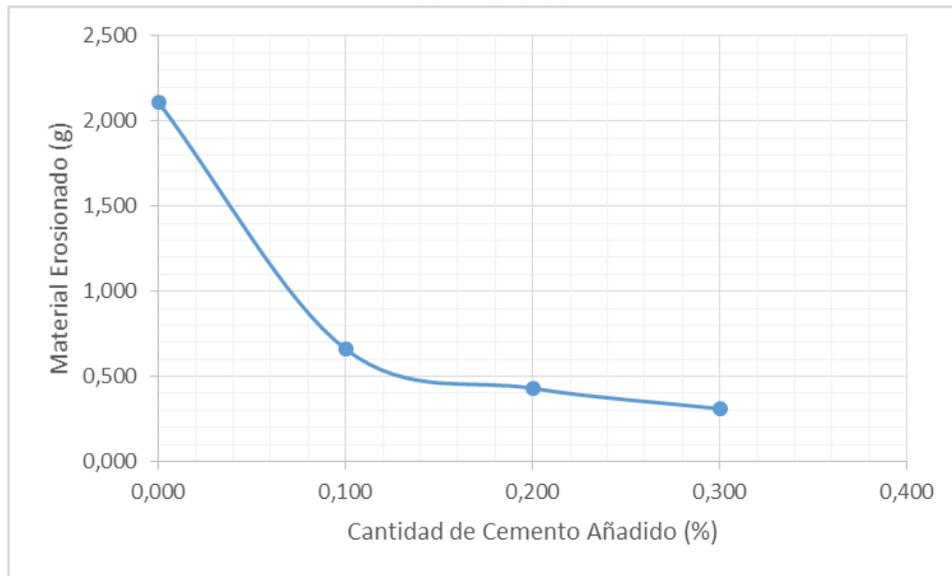


Gráfico 6. Variación de la Infiltración Respecto al Cemento Añadido

Fuente. Cuadro 8

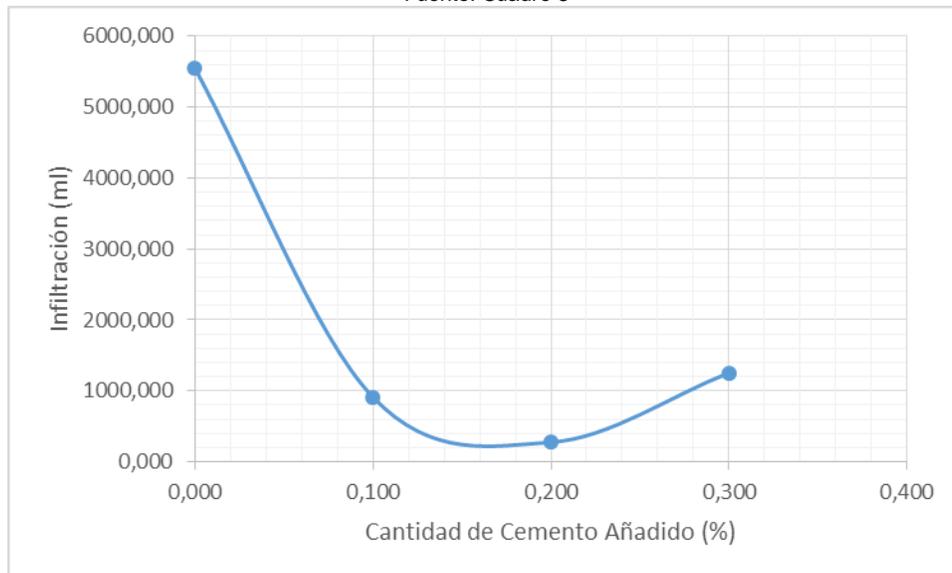
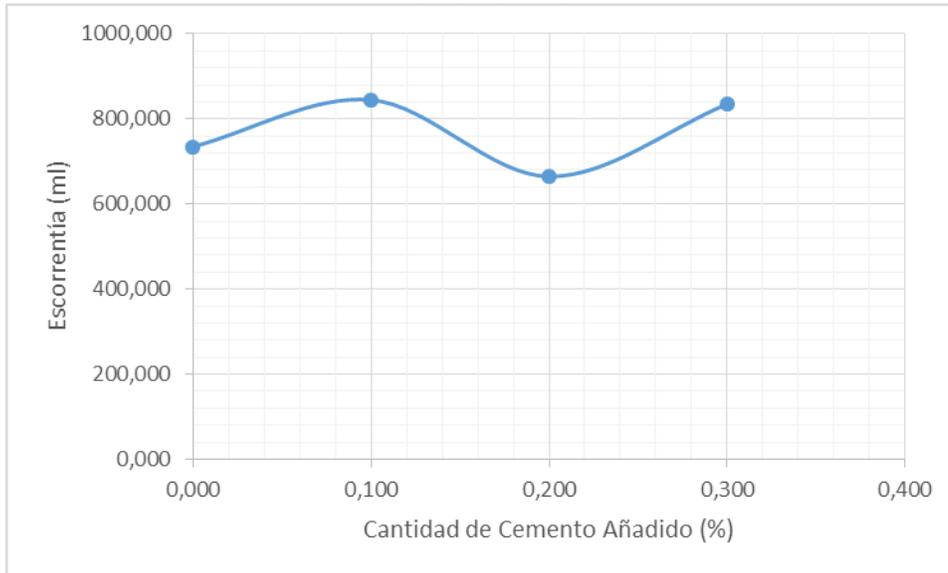


Gráfico 7. Variación de la Escorrentía Respecto al Cemento Añadido

Fuente. Cuadro 8



Análisis de los resultados

El objetivo general del presente trabajo requería el análisis geotécnico de un lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, en especial su desempeño ante el fenómeno de la precipitación; esto para evaluar el desempeño de su potencial de erosión mediante ensayos de laboratorio.

Al iniciar con la caracterización geotécnica del material, el ensayo de límites de consistencia no puede ser concluido debido que los valores obtenidos de porcentaje de humedad para cada punto se presentan de manera anormal; ya que este presenta grandes diferencias entre ellos; lo que hace imposible linealizar la gráfica para realizar los cálculos establecidos por la norma ASTM D4318-10.

El comportamiento del material es el esperado para un suelo orgánico, pues en menor número de golpes el contenido de agua necesaria para añadir a la mezcla aumenta en gran medida lo que implica un aumento en el porcentaje de humedad. —Estos resultados pueden ser ocasionados por características típicas de este material orgánico como lo son la alta retención de agua o la presencia de minerales arcillosos como por ejemplo el aluminio o el sílice que afectan la absorción y liberación de agua; por lo cual se dice que es un material no plástico a pesar de la gran cantidad de finos que presenta, al comparar nuestro resultado con investigaciones sobre el mismo material (Solano, 2015) se presenta la similitud de que el ensayo no fue completado de forma adecuada, pero se concuerda en que se está ante un material no plástico clasificado según el autor como arenoso y con pocos finos. También es importante destacar que a nivel nacional se han realizado análisis a este mismo tipo de lodos (Rivera, 2012) provenientes de otras plantas de tratamiento donde se concluye que es un material plástico, lo que evidencia la necesidad de ampliar los estudios sobre este tema; tomando en cuenta la variabilidad de resultados y métodos de extracción

y manipulación que puedan presentar estos materiales.

Tomando como punto de partida el resultado que se obtuvo en los ensayos de límites de consistencia, se decidió comparar el material en estudio con cenizas volcánicas o suelos compuestos por las mismas.

La granulometría se decidió realizarla por el método de hidrómetro, basados en que si se realizaba una granulometría por mallas los tamaños que se iban a obtener iban a depender del aglutinamiento que se originaría en el horno, por lo que no se estuviera ante un tamaño de partícula real, ya que este material al entrar de nuevo en contacto con el agua estos grumos se desintegraran y volverá a ser el material fino lo cual es característica de los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Los valores teóricos del tamaño de partícula para suelos provenientes de cenizas volcánicas se establecen como menores a los 0,08 mm (Sanhueza, C.; Palma, J.; Valenzuela, P.; Araneda, O.; Calderón, 2001). Por ello, la muestra se asemeja en gran medida, ya que comprende el rango desde los 0,01 mm hasta el orden los 0,0006 mm tal como se puede ver en el cuadro 2. En este caso más del cincuenta por ciento de la muestra presenta un tamaño de partícula entre 0,003 mm a 0,004 mm. La forma de la curva granulométrica depende del tipo de tratamiento que se le da a los desechos que producen el lodo así como de la calidad y tipo de desechos que se procesan en la planta, por lo que este resultado se toma como característico del tipo de lodo al que se le practicó el ensayo.

La gravedad específica de este material lo clasificaría como una *Turba* (González, 2002) debido a su bajo valor que se debe principalmente al secado que se somete el material, ya que al ingresar el material cual en su mayoría en materia orgánica se destruye debido a la alta temperatura lo cual provoca que la gravedad específica del material baje, esto

provocado por la diferencia entre el peso de entrada al horno y el de salida.

Con un valor de $G_s=1,787$ obtenido mediante el ensayo de laboratorio; el resultado es válido, ya que se asemeja a datos obtenidos en la literatura como de una gravedad específica de $G_s=1,71$ obtenida en un lodo de planta de tratamiento (Bobba, 2005), es de destacar que los valores de gravedad específica dependen del tipo de desecho que genera el lodo y del tratamiento que este reciba para producir nuestra materia prima.

El ensayo de permeabilidad presentó dificultades al momento de aplicar el procedimiento debido que al añadir agua para obtener la densidad seca máxima del material, por lo que al añadir el agua nunca se logró que el lodo se homogenizará por completo, pues siempre se observó en la bandeja un residuo considerable de agua, esto se debe a la variabilidad del material al absorber y liberar humedad.

El valor de conductividad hidráulica de $k=1.12 \times 10^{-9}$, sobrepasa los valores teóricos para suelos compuestos por cenizas volcánicas como es el caso de un país como Chile la permeabilidad de estos suelos está en el rango de 6×10^{-5} cm/s – $8,74 \times 10^{-5}$ cm/s (Sanhueza, C.; Palma, J.; Valenzuela, P.; Araneda, O.; Calderón, 2001) y en Colombia presenta valores medios de permeabilidad en este tipo de suelos de 5.43×10^{-5} cm/s.

Las variaciones obtenidas se deben principalmente a que en el procesos de saturación del material no se tuvo el suficiente tiempo en la pila de agua, esto por motivos de disponibilidad, debido a que también se utiliza para la venta de servicios del *LabCIVCO*. También se sabe de la teoría que la permeabilidad depende de variables como la estructura del suelo y la geometría de poros y debido a que se están en presencia de un suelo altamente orgánico estas sufren cambios irreversibles en el proceso de secado.

El resultado del ensayo de Proctor estándar al ser suministrado se puede evidenciar según la investigación (Solano, 2015) que no ocurrieron problemas considerables en su procedimiento, por lo que, al comparar el valor obtenido, según el gráfico 2 con los valores teóricos de densidad seca máxima 1520 kg/m^3 y una humedad del 77% en suelos con alto contenidos de ceniza (Sanhueza, C.; Palma,

J.; Valenzuela, P.; Araneda, O.; Calderón, 2001); estos valores están por encima de los datos obtenidos en los ensayos pero los datos son aceptados ya que es una característica propia del material en estudio y además se debe conocer que los lodos presentan bajas densidades secas.

También pueden influir en el resultado la difícil homogenización del material con el agua y la dificultad al momento de compactar el material en el molde; ya que aunque no se realizó el ensayo, el procedimiento del ensayo de permeabilidad, por ello, el bajo valor de densidad seca con respecto al teórico puede recaer en un no adecuado proceso de compactación.

Con respecto a la clasificación geotécnica del suelo artificial en estudio, se puede ubicar en diferentes tipos de suelos que no tengan tanto contenido orgánico; pues si fuera por los datos obtenidos de permeabilidad, se pudiera clasificar como una arcilla de baja plasticidad (CL) y si fuera por el valor de gravedad específica, se considera como una turba, este si teniendo alto contenido orgánico. Pero con el tipo de suelo que más tiene similitud teniendo como excepción sus límites de plasticidad es con suelos conformados por cenizas volcánicas, los cuales se clasifican según investigaciones realizadas en Colombia y Chile como limos de alta compresividad según la clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

Con respecto a la caracterización ambiental se debe tener como aspecto principal, que en Costa Rica no existe ninguna reglamentación sobre el uso de lodos ni tampoco los valores permisibles de grado de contaminación, contenido de nutrientes y contenido de materia orgánica para su uso en otras aplicaciones.

De los ensayos aplicados al lodo, este no cumple con la demanda química y biológica de oxígeno ni tampoco con el pH por lo que se debe de estudiar el lugar de colocación y la vegetación que se requiera sembrar, ya que sobrepasa 0,71 el límite permitido; aunque no es una valor tan significativo se debería realizar un estudio del pH del lugar donde se colocará.

A pesar de estos valores que sobrepasan los límites establecidos por la Agencia de Protección Ambiental y el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales de Costa Rica, por lo que según la investigación que realizó los criterios de evaluación ambiental considera el lodo artificial de la planta de tratamiento de aguas

residuales domesticas utilizados en este proyecto como aceptables para un uso agrícola (Solano, 2015). Por ende, queda la opción de realizar mejoramiento al material especialmente en el proceso de secado o también pudiendo terminar el proceso de la línea de lodos correctamente, ya que en la planta de tratamiento de aguas residuales domesticas utilizadas para este proyecto los factores climáticos afectan en gran medida la producción de lodos y por ende, su calidad.

En relación con la curva de calibración del simulador hidrogeológico, se debe tomar como punto de partida que el sistema hidráulico que suministra el agua al dispositivo está conectado a la red de suministro de agua del *LabCIVCO*, por lo que no se tiene control de los cambios de presión y caudal que se puedan dar durante el ensayo solo se mide mediante el uso del fluxómetro y el manómetro utilizado para su diseño (ver apéndice 2).

Los ensayos fueron realizados alrededor de las tres de la tarde, esto debido a que el uso de otras salidas de agua en el edificio no están siendo utilizadas y es cerca la hora del cierre de la jornada laboral; el solo utilizar las presiones de (0,25; 0,375; 0,5; 0,6; 0,7) kg/cm^2 se debe los siguientes aspectos mencionados a continuación:

- Al colocar los aspersores en los ángulos deseados, primero se realizaron ensayos sin utilizar la bandeja donde se evidenció que con estas presiones se aseguraba cubrir de manera homogénea el área requerida. Debido a que a mayor presión el ángulo de aspersión de agua se amplía, provocando que el agua lanzada caiga sobre los plásticos que cubren el simulador y no cubren el área donde estará ubicado el suelo.
- En los primeros tres valores de presión mencionados anteriormente, el tamaño de la gota de agua que cae de los aspersores se puede considerar representativa de una lluvia fuerte, esto se determina según la sensación de estas sobre la palma de la mano tomando en cuenta que este ensayo no considera tamaño de gota, ya que de 0.6 kg/cm^2 la sensación es similar a lo que llaman popularmente “pelo de gato”.
- A partir de una presión de 0,8 kg/cm^2 , se torna muy difícil tener valores de presión constante alrededor de quince minutos

que es el tiempo que dura la ejecución del ensayo, pues lo que se pretende es tener una intensidad constante durante la prueba.

Para la medición de la medición se utilizaron probetas en ambos extremos donde estaría ubicada la bandeja, cada uno con una capacidad de 1000 ml; estos servirían como pluviómetros durante la ejecución del ensayo; este método permite obtener las curvas de calibración del equipo que se muestran en la gráfica 4 donde se muestra la dependencia de la intensidad en variación a la presión en el sistema, es importante mencionar que los datos de intensidad mostrados en la gráfica presenta gran similitud con eventos picos que se han dado por ejemplo en la ciudad de San José (Recio & Fallas, 2015), que causaron caos vial e inundaciones.

Se pretende seleccionar una presión que determine una intensidad mayor lo que implicaría una mayor cantidad de volumen de agua en las probetas y una menor diferencia entre las probetas de ambos extremos. Como se muestra en el cuadro 6, al parecer los aspersores ubicados al frente del simulador presentan mayor aspersión de agua por lo que se debe buscar la menor diferencia con los traseros esto en relación a volumen recolectado en las probetas, al poder obtener una menor diferencia se asegura que el material será sometido a un misma intensidad y no se tendrá variaciones de la misma.

Es de tomar en cuenta que el área de abertura de las probetas es de 28,04 cm^2 , por lo que eso puede ser un factor determinante en los valores de intensidad requerida, pero debido a que es el recipiente que más se presta es el utilizado en los ensayos; como se observa en el cuadro 6 las diferencias volumétricas en las presiones de (0,5; 0,6; 0,7) kg/cm^2 se mantienen constantes en 60 ml, pero es en el valor de presión de 0,5 kg/cm^2 donde se obtiene mayor cantidad de volumen en cada probeta.

Al ver los datos del cuadro 7, se observa claramente que los mayores datos de intensidad en conjunto o sea para ambas probetas en el mismo ensayo, por tanto, se selecciona la presión de 0.5 kg/cm^2 para la realización de los ensayos de erosión, ya que se asegura una intensidad mayor a los 50 mm/hr en cada extremo de la bandeja de prueba.

Un valor de intensidad de lluvia mayor a 50 mm/hr asegura un aguacero considerable que pueda provocar algún grado de erosión, con el

dato de presión en el sistema seleccionado se asegura una intensidad promedio en el ensayo de 59.20 mm/hr. Esta intensidad se considera como la óptima para ensayos de erosión en el simulador hidrogeológico diseñado en este trabajo, pues asegura una lámina de agua lo más homogénea posible sobre la bandeja de material, además de que la presión con la que se obtiene dicha intensidad se puede mantener constante mediante los medios de control que presenta el simulador.

Es importante acotar que para todas las pruebas realizadas en el simulador con diferentes contenidos de cemento, la cantidad de agua caída se subdivide en infiltrada y escurrida; dichos rubros se calculan de forma porcentual esto para asegurar que existan aumentos o disminuciones en los datos tabulados.

En el primer ensayo de erosión, el lodo en su estado seco por ser ingresado al horno, presenta una apariencia de material granular grueso, sin presencia de finos debido al aglutinamiento sufrido por el proceso de deshidratación, al no tener una máquina que nos otorgue la velocidad del agua sobre la superficie y el esfuerzo cortante que sufre la interface de suelo; solo se analizaron los sedimentos en la canoa del simulador y la infiltración en la bandeja del piso falso.

Los valores más altos de erosión se presentan en el ensayo donde el material no presenta ningún contenido de cemento, debido a que, a pesar de la compactación aproximada que se le da, no presenta ningún tipo de material más fino que funcione como amarre entre las partículas gruesas por lo que es más fácil desprender el material de la superficie aún.

La escorrentía es considerable ya que al estar cayendo un flujo de agua constante sobre todo el estrato de suelo, la mayoría de los espacios vacíos se comienzan a llenar de agua, debido al diseño de la bandeja solo se puede drenar por los agujeros determinados para infiltración, por lo que el agua toma algún tiempo en atravesar el estrato; mientras que el agua que continúa cayendo alguna si inicia el proceso de infiltración y el resto escurre debido a la pendiente; del mismo modo ocurre con la infiltración al presentar el lodo características de material granular presenta un alto contenido de vacíos que sirve para que el agua infiltrada circule a una velocidad mayor.

Estos valores del ensayo sin contenido de cemento serán tomados como características del suelo y servirán como patrón para el mejoramiento con el material cementante.

Al añadir un 10% de cemento a la mezcla, se evidencia de inmediato en el gráfico 5 que la erosión disminuye de manera parcial esto debido a que el material cementante no cubre del todo el material, ya que es de importancia mencionar que al añadir agua para obtener la densidad seca máxima el cemento no cubre por completo la partícula de lodo sino que lo hace en ciertas partes, pero estas a su vez ayudan a mantenerlas unidas con otras lo cual reduce la erosión en más de un gramo.

La escorrentía debido a la ahora si presencia de material fino que en este caso es el cemento que adsorbe agua con facilidad, llega al estado de saturación más rápido evitando la infiltración del agua y obligándola a escurrir sobre la superficie expuesta con mayor facilidad lo cual se ve reflejado en el gráfico 7, esto se debe a que el cemento añadido funciona como una capa divisoria entre los fragmentos de suelo; lo cual con base en la curva de retención de agua, al clasificarse como un material fino disminuye el grado de saturación aumentando la succión de agua del entorno donde se encuentre (Bouazza, Zornberg, McCartney, & Singh, 2013).

Con la infiltración debido a la presencia ya de material fino en los espacios interpartícula, presenta una disminución considerable dado que el agua primero debe saturar todo el estrato de suelo del ensayo para que inicie el proceso de permear el agua, ya que el concreto cumple como sello eficiente para crear el estrato más impermeable que el anterior reduciendo la infiltración en más de 4000 ml.

Los resultados obtenidos con un 20% de cemento en el material, se observa a simple vista la presencia de material fino que en esta ocasión si cubre por completo las partículas de lodo, por ello, el aglutinamiento aumenta debido al porcentaje de cemento que se tiene por lo que se reduce aún más la erosión como se observa en la gráfica 5.

En relación con la infiltración presenta el valor más bajo de todos los ensayos, esto se debe a que al contener más cemento el estrato el agua se absorbe de manera más rápida y dura más en llegar hasta la base del estrato esto debido a que los espacios entre las partículas se encuentran llenos de cemento, como se observa en el gráfico

6, el material con este porcentaje de cemento representa un punto mínimo en la gráfica

La escorrentía disminuye, ya que el cemento que se encuentra en la mezcla de lodo-cemento absorbe la mayoría de agua que cae por medio de los aspersores, por lo que se puede decir que la escorrentía inicia casi al final del ensayo que es donde el estrato, especialmente el cemento ha terminado de absorber toda el agua posible para iniciar su fragua.

Cuando se añade un 30% de cemento al lodo se observa que se recubren por completo las partículas de lodo, pero aun así existe una gran cantidad de cemento que se aglutina en pequeños grumos, lo cual mantiene la consistencia de agregado granular sin presencia de finos, dado que los finos al estar en gran cantidad se unen en grumos al entrar en contacto con el agua, a pesar de estos la erosión consigue su punto mínimo como se evidencia en la gráfica 5, pues en la superficie se forma una especie de lámina de lodo-cemento bastante rígida que evita la erosión gracias al aglutinamiento de partículas de lodo recubierto y grumos de cemento pero que presenta una porosidad alta, una textura similar a la del concreto permeable.

Debido a la porosidad (ver gráfico 6) que presenta el estrato, tal como se mencionaba anteriormente la infiltración aumenta con respecto a los resultados con 10% y 20% de cemento añadió lo cual no se considera como un retroceso, ya que aún así la reducción de este parámetro es considerable con respecto al obtenido con el material sin ningún tipo de cemento, este aumento se debe a la porosidad y contextura que adopta el estrato con este porcentaje de cemento y a la formación de grumos que provocan más espacios libres en vez de estos ser llenados por una pasta de cemento.

La escorrentía aumenta a pesar de la porosidad que presenta el estrato, esta característica permeable no se hace a gran

rapidez por lo que un porcentaje de la lámina de agua que cae sobre la superficie en estudio escurren con mayor facilidad que los porcentajes utilizados anteriormente.

Por lo cual se pretende usar las gráficas correspondientes de erosión, infiltración y escorrentía para la posible utilización de este material para utilización en zonas de recuperación de tajo o material de relleno; tomando en cuenta los valores que minimicen estos aspectos pero que a su vez mantengan un uso adecuado del concreto a utilizar para reforzar el lodo.

En el gráfico 5 de erosión, se trata de aproximar una cantidad de cemento que no se acerque al 30%, pues a pesar de tener una disminución en la erosión, aumentan otras características como infiltración y escorrentía, por tanto, se selecciona un valor entre los puntos obtenidos de 10% y 20% de porcentaje de cemento, por lo que se escoge según la gráfica de dispersión un valor de cemento añadido de 1,4 kg que equivale a un 14,5% de cemento a añadir.

Los valores de infiltración mínimos se obtienen mediante la curva de dispersión del gráfico 6 donde se toma la cantidad de cemento añadido que reduce de forma significativa la variable infiltración con 1,5 kg que equivale a un 15,5 %. El valor de menor escorrentía se obtiene al añadir un 20% de cemento, tal como se observa en la gráfica 7 dicho porcentaje representa un punto mínimo de la gráfica.

Por tanto, respaldado en los valores estipulados anteriormente que reducen las variables estudiadas en este ensayo, se seleccionó el porcentaje de cemento a añadir mayor, pues con este se asegura el cumplimiento de minimizar las variables que presentan un porcentaje de cemento mejor; añadido a esto el suelo artificial mejorado con un 20% de cemento presenta características muy similares con respecto a suelos inorgánicos.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

1. El lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales que para nuestro proyecto funge como un lodo artificial, presenta características de suelo no plástico, con gran cantidad de finos que no son vistos a simple vista debido al aglutinamiento sufrido por el proceso de secado, una permeabilidad del orden de (10^{-9} m/s) característica de suelos provenientes de cenizas volcánicas y una gravedad específica típica en suelos con alto contenido orgánico. Teniendo una clasificación general como un limo de alta compresividad.
2. En relación con el análisis ambiental al que fue sometido nuestro suelo artificial, se considera un material aceptable para el uso agrícola pero siempre puede ser mejorado para un uso más seguro a la intemperie.
3. La intensidad de lluvia seleccionada es de 59,2 mm/hr, dado que es la intensidad que se presenta de manera más homogénea sobre la bandeja de suelo y que la red permite mantener por más tiempo sin presentar fluctuaciones considerables.
4. El ángulo de inclinación máximo por motivos de la ubicación del simulador dentro del LabCIVCO fue de 18,94°.
5. Se somete el suelo a un intensidad mayor a los 50 mm/hr durante una duración de 15 minutos por lo que los valores obtenidos del material sin ningún contenido de material cementante se toman como patrones de erosión, infiltración y escorrentía.
6. El cemento añadido al material altera las características geotécnicas como la saturación y el tamaño de las partículas.
7. El porcentaje de erosión del suelo artificial se considera alto tomando en cuenta las dimensiones de la muestra de suelo y el ángulo de inclinación.
8. El valor de escorrentía se puede considerar razonable, ya que el material al no estar saturado por completo aún puede absorber un poco más de agua de la que cae, lo que reduce un poco la escorrentía.
9. Los valores de infiltración son altos, debido a la granulometría que adquiere el material secado, esto lo hace apto para utilizarse como material de filtro.
10. El porcentaje de cemento óptimo que reduce las variables de infiltración, erosión e infiltración; pero se toman en cuenta no solo los valores mínimos que se puedan obtener, así como el comportamiento y la contextura final que presenta el suelo; basado en estos aspectos la relación de costos que ayuda a disminuir las variables es de 20% de 9.66 kg de material.

Recomendaciones

1. Se deberían tomar en cuenta en el tema de hidrología, la medición del tamaño de gota, velocidad de caída de la gota y una altura de aspersores que asegure una velocidad constante al momento de impactar con el suelo.
2. El simulador hidrogeológico debería de contar con una bomba y su respectivo tanque de suministro esto para asegurar presiones y caudales constantes, para que estos no dependan de la red e influyan en fluctuaciones.
3. Se debería de utilizar un material que tenga las cualidades de ser transparente pero que soporte la compactación obtenida del Proctor, pues el acrílico al impactar ya sea con un mazo u otro aparato se quiebra, por lo cual no se puede dar la densidad seca máxima al suelo.
4. Analizar el grado de contaminación y la ejecución de ensayos ambientales al agua infiltrada y de escorrentía, esto para asegurar que no tengan afectaciones sanitarias.
5. Se deberían de realizar ensayos de mineralogía para corroborar la existencia de materiales arcilloso como aluminio y sílice.
6. Para determinar la plasticidad de manera más clara se podría realizar el ensayo de límites de consistencia mediante la norma británica.

Apéndice

Apéndice 1. Datos de ensayos de caracterización geotécnica realizados al suelo artificial.

Apéndice 2. Planos de taller del simulador hidrogeológico.

Apéndice 3. Calibración del simulador hidrogeológico.

Anexos

Anexo 1. Catálogo de aspersores utilizados.

Referencias

- Aparios, F. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. (LIMUSA, Ed.) (I edición).
- Bobba, R. (2005). *Artificial soil as evapo-transpirative hydraulic barrier*. University of Missouri - Columbia.
- Bouazza, A., Zornberg, J., McCartney, J. S., & Singh, R. M. (2013). Unsaturated geotechnics applied to geoenvironmental engineering problems involving geosynthetics. *Engineering Geology*, 165, 143–153.
<http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.11.018>
- Briaud, J. (2013). *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*. Wiley.
- Cerón, O., Millán, S., Espejel, F., Rodríguez, A., & Ramírez, R. (n.d.). *APLICACIÓN DE LODOS DE PLANTAS POTABILIZADORAS PARA ELABORAR MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN*. Retrieved from http://web.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EO/TAO-05.pdf
- Chow, W. Te. (1964). *Handbook of applied hydrology*. (McGraw-Hill, Ed.). New York.
- Das, B. (2006). *Principles of Geotechnical Engineering* (quinta).
- Dilek, F.; Clarkson, W.; Aerne, P. (2011). *Sludge Engineering The Treatment and Disposal of Wastewater sludges*. Lancaster, Pennsylvania: DEStech.
- García, N. O. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1, 51–58.
- Gomez, N. (2012). *Diseño de un modelo a escala reducida para análisis de estabilidad de taludes*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. (Pearson, Ed.). Madrid.
- NSW Department of Primary Industries. (n.d.). Fact sheet 1: Types of erosion. Retrieved from http://www.dpi.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/255153/fact-sheet-1-types-of-erosion.pdf
- Rahalmo, R. (1990). *Tratamiento de Aguas Residuales* (I Edición). Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- Recio, P., & Fallas, G. (2015). Lluvias inundan calles y viviendas de San Pedro, Los Yoses y barrio Luján. *La Nación*. San José. Retrieved from http://www.nacion.com/sucesos/seguridad/Cruz-Roja-inundaciones-Valle-Central_0_1520648034.html
- Retana, J. (2012). Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima. *Ambientales*, 44, 76.
- Rivera, J. (2012). *Caracterización geotécnica de un prototipo de suelo artificial*. Universidad de Costa Rica.
- Sanhueza, C.; Palma, J.; Valenzuela, P.; Araneda, O.; Calderón, K. (2001). Evaluación del comportamiento geotécnico de suelos volcánicos chilenos para su uso como material de filtro en la depuración de aguas residuales domésticas. *Revista de La Construcción*, 10, 66–81. Retrieved from

http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2011000200007&script=sci_arttext

Solano, V. (2015). *Caracterización mecánica y ambiental para la aplicación geotécnica de un suelo artificial elaborado a partir de lodos de diferentes edades , provenientes de una planta de tratamiento de agua residual doméstica*. Universidad de Costa Rica.

Sorrequeta, A. (2004). *Aguas Residuales : Reuso y Tratamiento . Lagunas de estabilización : una opción para Latinoamérica*. Retrieved from http://www.fbioyf.unr.edu.ar/evirtual/pluginfile.php/2784/mod_resource/content/0/2_Aguas_residuales_protegido_.pdf

Vahrson, W.-G., Romero, M., Arauz, I., Sánchez, S., & Chacón, R. (1992). *Análisis*

Probabilístico de Lluvias en Costa Rica. Revista Geográfica de América Central, 45–58. Retrieved from <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2863/2736>

Vidal, P. (2014). *Notas Curso de Análisis Ambiental 1*. San José: Escuela de Ingeniería Civil UCR.

Villalobos Villalobos, A., & Incer Arias, A. (2010). *Manejo de Lodos en Costa Rica Contexto político, legal e institucional*.

Villón, M. (2004). *Hidrología* (1a. ed). Cartago: Tecnológica de Costa Rica.