

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE QUÍMICA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Fabricación de barreras hidrofóbicas a partir de residuos de aceite de palma y
borosilicato como alternativa para optimizar el uso de agua de lluvia”**

Josefina Alexandra Sullivan Porras

CARTAGO, noviembre, 2021

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental



Esta obra está bajo una licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

“Fabricación de barreras hidrofóbicas a partir de residuos de aceite de palma y borosilicato como alternativa para optimizar el uso de agua de lluvia”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura.

Miembros del tribunal

Dr. Federico Masis Meléndez
Supervisor

Dra. Lilliana Abarca Guerrero
Lector 1

Ing. Jorge Calvo Gutiérrez
Lector 2

Dra.ir. Mary Luz Barrios Hernández
Coordinadora COTRAFIG

MGLA. Ricardo Coy Herrera
Director Escuela de Química

MSc. Ana Lorena Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

AGRADECIMIENTOS

A mis papás, por apoyarme en lograr mis metas y por las muchas oportunidades que me han brindado. A mis hermanos, por acompañarme estos años y por las noches de estudio que compartíamos.

A mi tutor, Federico Masís Meléndez, por compartir su conocimiento de la física de suelos desde hace 3 años; por su paciencia en guiarme y motivarme; y por su disposición incondicional a ayudar.

A COOPEAGROPAL por permitirme trabajar con sus residuos sólidos.

Al proyecto, “Desarrollo de un sistema sostenible de cosecha de agua atmosférica para uso comunitario y en sistemas productivos en Costa Rica” de la Escuela de Ingeniería Electrónica, TEC. En especial a Renato Rímolo y Aníbal Ruíz, por su apoyo en la ejecución de esta investigación.

A la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, TEC por el apoyo brindado durante la investigación, en particular a la ingeniera María Badilla Sánchez.

Al CEQIATEC por el préstamo de equipo y consejos.

A los profesores que más me motivaron e inspiraron: Diana Zambrano, Andrea Acuña, Allen Puente, Cassia Soto, Lilliana Abarca y Federico Masís.

A mis amigos, por su apoyo y amor por tantos años; y por convertirse en mi familia lejos de casa. Melany Díaz, Luis Gómez, Rodrigo Rojas, Nicolás Morales y Abigail Zamora.

A mi novio, Lucas Boneo, por ser quien me motivó y acompañó durante este proceso, por darme palabras de aliento en los momentos más difíciles, y por siempre creer en mí.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1. Arenas hidrofóbicas.....	4
3.1. Materias primas	4
3.1.1. Vidrio borosilicato	4
3.1.2. Lodo del proceso de extracción de aceite de palma	5
3.2. Aplicaciones de arenas hidrofóbicas	6
3.2.1. Barrera capilar	7
3.2.1. Aplicaciones de barreras capilares en suelo	8
3.3. Hidrofobicidad y ángulo de contacto	10
3.3. Ascenso capilar y la curva característica de retención de agua (CCRA)	12
3.6. Precipitación efectiva	14
4. MATERIALES Y MÉTODOS	17
Capítulo 1. Examinación de la transformación de residuos sólidos del lodo de aceite de palma y vidrio borosilicato en arenas hidrofóbicas.....	17
4.1. Extracción de materia prima	17
4.1.1 Extracción de grasa residual	17
4.1.2 Producción de arena.....	18
4.1.3. Distribución de partículas de arena	20
4.2 Recubrimiento de arenas y evaluación de hidrofobicidades	22
4.2.1 Pretratamiento de arena	22
4.2.2 Recubrimiento con ácido esteárico.....	23
4.2.3 Recubrimiento con GLAP	24
4.2.4 Evaluación de hidrofobicidad.....	25
4.2.5. Evaluación de hidrofobicidad con la compactación	26
4.2.6. Imágenes SEM.....	27

Capítulo 2. Valoración del uso de arenas hidrofóbicas en barreras capilares hidrofóbicas para la cosecha de agua.	27
4.3. Parámetros hidráulicos de arenas hidrofóbicas	28
4.3.1. CCRA de arenas hidrofóbicas	28
4.3.2. Conductividad hidráulica saturada	30
4.4 Sitio de estudio y muestreo	30
4.5. Caracterización del suelo de Isla Caballo	32
4.5.1. Textura.....	32
4.5.2. Curva de distribución de partículas mediante datos del hidrómetro de Bouyoucos	33
4.5.3. CCRA del suelo de Isla Caballo	34
4.6. Datos meteorológicos.....	36
4.6.1. Cálculo de evapotranspiración potencial.....	37
4.6.2. Cálculo de precipitación efectiva	38
4.7. Estudio de caso en Isla Caballo.....	38
4.7.1. Datos meteorológicos empleados	38
4.7.2. Infiltración acumulada sobre la barrera capilar hidrofóbica.....	39
4.8. Tratamiento estadístico	40
4.8.1. Prueba T.....	40
4.8.2. Parámetros de calidad de modelos de van Genuchten.....	41
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
5.1. Capítulo 1. Examinación de la transformación de residuos sólidos del lodo de aceite de palma y vidrio borosilicato en arenas hidrofóbicas.....	42
5.1.1. Extracción de grasa residual a partir del LAP.	42
5.1.2. Distribución de partículas de arena sintética.	43
5.1.3. Ángulo de contacto de arenas hidrofóbicas.	45
5.1.4. Efecto de compactación y calor en el ángulo de contacto de LP-M.....	49
5.2. Capítulo 2. Valoración del uso de arenas hidrofóbicas en barreras capilares hidrofóbicas para la cosecha de agua.	51
5.2.1. Propiedades hidráulicas de la arena sintética y las arenas hidrofóbicas.....	51
5.2.2. Caracterización del suelo de Isla Caballo.....	55
5.2.3. Datos meteorológicos de Isla Caballo.	58
5.2.4. Infiltración acumulada en épocas de cosecha en la Isla Caballo.	59
6. CONCLUSIONES	64

7. RECOMENDACIONES	65
8. REFERENCIAS	67
9. APÉNDICES	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diseño de una barrera capilar de loess y grava para rellenos sanitarios	7
Figura 2. Diagrama de aprovechamiento de agua de lluvia por medio de una barrera capilar hidrofóbica, elaboración propia	9
Figura 3. Cosecha de agua mediante condensación de aire	10
Figura 4. Ángulo de contacto de una gota con una superficie	11
Figura 5. Variables de la precipitación efectiva en el suelo	15
Figura 6. Proceso de extracción de la GLAP	18
Figura 7. Arenas sintéticas retenidas en la malla N° 70	20
Figura 8. Limpieza de arenas	23
Figura 9. Arenas con disolución de ácido esteárico en reposo	23
Figura 10. Mezclado de arena sintética con GLAP	24
Figura 11. Arena sintética recubierta de LP mediante disolvente	25
Figura 12. Goniómetro Ramé-Hart 500	25
Figura 13. Equipo de compactación de arena LP	26
Figura 14. Preparación de muestras de arenas para la toma de fotografías SEM	27
Figura 15. Tensiómetro	28
Figura 16. Equipo para la recolección de datos de la CCRA de las arenas hidrofóbicas	29
Figura 17. Ubicación de Isla Caballo en Costa Rica	31
Figura 18. Suelo de Isla Caballo empacado	34
Figura 19. Equipo "Hanging Water Column"	35
Figura 20. Ubicación de estaciones meteorológicas	37
Figura 21. Proporción de grasa extraída del LAP por número de extracción	42
Figura 22. Curva granulométrica de arena sintética	43
Figura 23. Fotografía SEM de arena sintética limpia	45
Figura 24. Ángulo de contacto inicial de arenas hidrofóbicas a distintas concentraciones de recubrimiento.	46

Figura 25. Variación del ángulo de contacto en el tiempo de recubrimientos.....	48
Figura 26. Imágenes SEM de arenas recubiertas de ácido graso.....	49
Figura 27. Ángulo de contacto de LP-M en el tiempo a distintas compactaciones.....	51
Figura 28. Propiedades hidráulicas de arena control y arenas hidrofóbicas.....	52
Figura 29. Caracterización del suelo de Isla Caballo.....	55
Figura 30. Curva característica de retención de agua y curva de conductividad insaturada para el suelo de Isla Caballo.....	57
Figura 31. Precipitación y evapotranspiración potencial mensual en Isla Caballo.....	59
Figura 32. Infiltración acumulada de agua modelada con Hydrus 1D a 20 cm y 50 cm de profundidad para dos épocas de cosecha.....	60

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros de molino de bolas.....	19
Cuadro 2. Masa y número de bolas utilizadas en el molino de bolas.....	19
Cuadro 3. Distribución de partículas de arena sintética resultado de la molienda de vidrio borosilicato.....	20
Cuadro 4. Tiempo de sedimentación y diámetros de partícula calculados a partir de la Ley de Stokes.....	34
Cuadro 5. Información de estaciones meteorológicas utilizadas.....	36
Cuadro 6. Configuración para simulación en Hydrus 1D.....	39
Cuadro 7. Diámetros y coeficientes de la curva de distribución de partículas de arena sintética.....	44
Cuadro 8. Comparación de ángulo de contacto inicial de LP-M a distintas temperaturas de secado y compactación.....	50
Cuadro 9. Parámetros del modelo de retención de agua de van Genuchten y valores de K_{sat}	53
Cuadro 10. Diámetros y coeficientes de la curva de distribución de partículas del suelo de Isla Caballo.....	56

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ley de Young.....	11
Ecuación 2. Ley de Cassie-Baxter	12
Ecuación 3. Altura de ascenso capilar	13
Ecuación 4. Modelo de retención de van Genuchten.....	13
Ecuación 5. Porcentaje de arenas retenidas por tamiz	21
Ecuación 6. Modelo de Rosin-Rammler	21
Ecuación 7. Suma de cuadrados del error	21
Ecuación 8. Coeficiente de uniformidad.....	22
Ecuación 9. Coeficiente de gradación.....	22
Ecuación 10. Conductividad hidráulica saturada.....	30
Ecuación 11. Ley de Stokes	33
Ecuación 12. FAO Penman-Monteith.....	37
Ecuación 13. Precipitación efectiva	38
Ecuación 14. Raíz cuadrada del error cuadrático medio.....	41

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

GLAP	Grasa residual del lodo del proceso de extracción de aceite de palma
LAP	Lodo residual de aceite de palma
LP-M	Arenas recubiertas de GLAP mediante mezclado
LP-D	Arenas recubiertas de GLAP mediante disolvente
AE	Arenas recubiertas de ácido esteárico
$K(h)$	Conductividad hidráulica insaturada [cm/día]
K_{sat}	Conductividad hidráulica saturada [cm/día]
θ	Contenido de agua volumétrico [m^3/m^3]
θ_s	Contenido de agua volumétrico saturado [m^3/m^3]
B_2O_3	Óxido bórico
Al_2O_3	Óxido de aluminio
P_{atm}	Presión atmosférica [Pa]
P_{liq}	Presión del líquido [Pa]

IPCC	Panel intergubernamental de cambio climático
AyA	Acueductos y alcantarillados
EPA	Agencia de protección ambiental de Estados Unidos
P. ef	Precipitación efectiva [mm] [L/m ²]
P	Precipitación [mm] [L/m ²]
ET ₀	Evapotranspiración potencial [mm] [L/m ²]
D _#	Diámetro de partícula máximo del #% de las partículas
C _u	Coefficiente de uniformidad
C _c	Coefficiente de gradación
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación
CCRA	Curva característica de retención de agua
CA	Ángulo de contacto [°]
USDA	Departamento de agricultura de Estados Unidos

RESUMEN

Este trabajo pretende presentar posibles soluciones para la gestión de residuos sólidos y mitigar el déficit hídrico en sitios que no cuentan con una red de suministro, como en la Isla Caballo, Puntarenas. Para ello se estudiaron arenas hidrofóbicas, las cuales tienen poca área superficial, por lo que pueden ser fácilmente recubiertas por materiales hidrofóbicos. Esto provoca una disminución en su capacidad de infiltración y una menor retención de humedad haciéndolos materiales con potencial para la construcción de barreras capilares hidrofóbicas como alternativa para geotextiles. Por lo anterior, se fabricaron arenas hidrofóbicas con un enfoque en el uso de materias primas locales disponibles, de bajo costo y que actualmente no se aprovechan. Se utilizó cristalería dañada de laboratorio como fuente de vidrio borosilicato y se molió para obtener una arena sintética con un diámetro entre 106 μm y 210 μm . Asimismo, se realizó una extracción líquido sólido del lodo residual de la producción de palma aceitera como fuente de grasa (GLAP). Se recubrió la arena producida con GLAP, utilizando dos metodologías distintas: mediante mezclado (LP-M) y mediante disolvente (LP-D). Se realizaron pruebas de ángulo de contacto a concentraciones de 0,1 g/kg, 0,3 g/kg, 0,6 g/kg, 1 g/kg, 1,3 g/kg y 1,6 g/kg; a grados de compactación de 1,2 g/cm³ y 1,3 g/cm³; en arenas secas al aire y secas a 105°C; comparando los resultados obtenidos de arenas recubiertas de ácido esteárico (AE) como referencia. Posteriormente, se realizaron pruebas hidráulicas en las arenas hidrofóbicas y en muestras empacadas con suelo de Isla Caballo. Se obtuvieron ángulos de contacto máximos de 119,73°, 118,83° y 107,48° para LP-M, LP-D y AE, respectivamente. Los resultados de las pruebas hidráulicas de las arenas mostraron una reducción en la conductividad hidráulica saturada, donde la arena sin recubrimiento obtuvo un valor de 170,5 cm/h mientras que LP-D y AE, de 4,5 cm/h y 3,4 cm/h, respectivamente. Adicionalmente, se realizó un estudio de las condiciones climáticas de la isla utilizando datos de los últimos 5 años provenientes de estaciones meteorológicas cercanas, del IMN. A partir de los datos se encontraron dos fechas con precipitaciones efectivas aptas para recolectar agua de lluvia: mayo y junio; y setiembre y octubre. Mediante un balance simulado con Hydrus 1D, se determinó que la cantidad de lluvia que podría ser interceptada en un año se encuentra entre 764 L/m² y 767 L/m². Los resultados obtenidos son prometedores para el manejo de residuos sólidos y el aprovechamiento de agua de lluvia en Isla Caballo mediante arenas hidrofóbicas en barreras capilares hidrofóbicas.

Palabras clave: arenas hidrofóbicas, barreras capilares hidrofóbicas, aceite de palma, vidrio borosilicato y agua de lluvia.

ABSTRACT

This study aims to present possible solutions for waste management and mitigation of water deficit in areas with no water distribution, for example, Isla Caballo, Puntarenas. Hydrophobic sands have low surface area, therefore can be easily coated by hydrophobic materials. This causes a reduction in its infiltration rate as well as a lower water retention capacity, making these potential materials for building hydrophobic capillary barriers, as an alternative to geotextiles. Moreover, this study manufactured hydrophobic sands using locally available, low-cost materials, which are currently discarded. Laboratory glass waste was used as a source of borosilicate glass, which was later crushed in order to produce synthetic sands with diameter range between 106 μm and 210 μm . Furthermore, a liquid-solid extraction was applied to residual sludge from the production of palm oil as a source of fat (GLAP). The sand was coated with GLAP through two methods: mixing (LP-M) and solvent-aided (LP-D). Contact angle measurements were performed at coating concentrations of 0,1 g/kg, 0,3 g/kg, 0,6 g/kg, 1 g/kg, 1,3 g/kg and 1,6 g/kg; at 1,2 g/cm³ y 1,3 g/cm³ compaction levels; on air-dry sand and sand dried at 105 °C. Its results were compared to stearic acid coating (AE) as a reference. Subsequently, hydraulic properties of the sands and packed soil from Isla Caballo were measured. Maximum contact angles for LP-M, LP-D and AE were 119,73°, 118,83° and 107,48°, respectively. The results of the hydraulic measurements revealed a reduction in saturated hydraulic conductivity: sands with no coating were at 170,5 cm/h, whereas LP-D and AE were at 4,5 cm/h and 3,4 cm/h, respectively. In addition, the meteorological conditions of the island were studied using data from the last 5 years, from nearby IMN meteorological stations. The data showed there are two periods with apt effective precipitation to harvest water: May to June and September to October. Through a simulated water balance using Hydrus 1D, a total amount of rainwater that could be intercepted was calculated to be around 764 L/m² y 767 L/m². The results indicate that the use of these hydrophobic sands in hydrophobic capillary barriers are a promising for waste management and water harnessing in Isla Caballo.

Key words: hydrophobic sand, hydrophobic capillary barriers, palm oil, borosilicate glass and rain water.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso básico para la supervivencia del ser humano y aun así, a nivel mundial, 2000 millones de personas viven en zonas de escasez extrema (Koncagül et al., 2021). Además, el último reporte del Panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés) indica que, en efecto, se alcanzará un aumento en la temperatura global de 1,5 °C, lo cual implica un aumento en sequías y meses secos al año, en ciertos lugares (IPCC, 2021). Costa Rica no es ajena a esta realidad, pues en el 2019 la NASA indicó que el país tuvo 75% menos precipitación que el año anterior, dato que se refleja en las mediciones de estrés en la vegetación de zonas vulnerables como en el norte de la nación (Solano, 2019). Entre los sitios con mayor escasez de agua en Costa Rica, se encuentra Isla Caballo, que actualmente se abastece por medio de pozos artesanales contaminados y pichingas de agua transportadas en bote desde Puntarenas, ya que no cuenta con acueductos (Artizar y Carillo, 2016).

A raíz de la creciente preocupación sobre los efectos de la emergencia climática, se han desarrollado sistemas, tecnologías y políticas de adaptación al cambio climático como lo es el aprovechamiento de aguas de lluvia (IPCC, 2007). Lo anterior es posible mediante materiales que intercepten el agua antes de ser infiltrada en el suelo, como las arenas hidrofóbicas. Estas consisten en arenas recubiertas de agentes hidrofóbicos, los cuales provocan repelencia al agua y consecuentemente, detienen la percolación profunda en el subsuelo (Lowe et al., 2021). Las arenas hidrofóbicas también son conocidas por su efectividad para proteger obras civiles del efecto de la lluvia (Zheng et al., 2017); son capaces de remover aceite de aguas contaminadas (Sun et al., 2021), disminuir evaporación en lagunas (Y. Liu y Choi, 2021) y proteger cableados eléctricos en edificios (DIME, 2008).

En cuanto a su aplicación en el suelo, se han utilizado como alternativa para el geotextil, el cual puede tener impactos ambientales negativos (Wu et al., 2020) y, en países en vías de desarrollo, puede implicar un costo importante (Subedi et al., 2013). Por ejemplo, en Japón se han desarrollado barreras capilares hidrofóbicas para la cobertura de rellenos sanitarios con arenas hidrofobizadas mediante ácidos grasos (Subedi et al., 2013). Su uso en rellenos sanitarios es de suma importancia para la protección del subsuelo y posibles fuentes de agua subterráneas. Por otro lado, si se cuenta con un terreno inclinado, se puede utilizar una barrera capilar hidrofóbica para aumentar la escorrentía y desviar el agua hacia una laguna de agua

dulce. Adicionalmente, en zonas áridas, se podría utilizar para crear una tabla de agua en el subsuelo, que permita mantener el suelo húmedo y se estimule la actividad agrícola (Saenz, 2009).

Para determinar la aplicabilidad de una barrera capilar hidrofóbica en el suelo como tecnología para aprovechar el agua de lluvia, es importante una planificación previa del uso del suelo. Las aplicaciones de la barrera son muchas pero su eficiencia depende de las necesidades y condiciones del sitio. Además, existe una gran variedad de formas de hidrofobizar arenas, pero para que sean de bajo costo, se debe investigar sobre materias primas locales y alternativas.

Una forma de utilizar materias primas locales y alternativas es el uso de residuos sólidos. Es posible fabricar arenas a partir de la molienda de un vidrio no reciclable como el borosilicato, ya que se encontró que sus propiedades se asemejan a la arena (Wartman et al., 2004). Adicionalmente, el lodo residual del proceso de extracción de aceite de palma contiene ácidos grasos, por lo que no pueden ser compostados, pero sí pueden ser utilizados para la hidrofobización de arenas.

Por lo tanto, la presente investigación pretende evaluar la fabricación de barreras capilares hidrofóbicas mediante arenas hidrofobizadas, elaboradas a partir de vidrio borosilicato molido y grasa extraída del lodo residual del proceso de aceite de palma. Asimismo, valorar su uso en el suelo de Isla Caballo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Proponer una barrera capilar sintética que prevenga la percolación de agua de lluvia en el subsuelo mediante la fabricación de arenas hidrofóbicas a partir de residuos sólidos de aceite de palma y vidrio borosilicato para su posible aplicación en la cosecha de agua en Isla Caballo, Puntarenas.

2.2. Objetivos específicos

Examinar la transformación de residuos sólidos de aceite de palma y vidrio borosilicato en arenas hidrofóbicas.

Valorar el uso potencial de arenas hidrofóbicas en la aplicación de barreras capilares hidrofóbicas en Isla Caballo, Puntarenas, considerando variables atmosféricas y el tipo de suelo.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Arenas hidrofóbicas

La hidrofobicidad en los suelos es un fenómeno que puede suceder de forma natural o artificial. Cuando un suelo se hidrofobiza de forma natural, suele ser por una acumulación de compuestos orgánicos provenientes de vegetación o microorganismos a partir de procesos naturales en el suelo (Cervera-Mata et al., 2021). Por otro lado, las acciones del ser humano también pueden provocar hidrofobización, como en el caso de derrames de aceite (Gordon et al., 2018). Asimismo, se pueden realizar recubrimientos de agentes hidrofóbicos en superficies de arenas para su estudio o uso posterior.

La literatura muestra que hay una variedad de agentes hidrofóbicos útiles para realizar recubrimientos, tanto naturales como sintéticos. Entre agentes hidrofóbicos naturales, se encuentra el biocarbón, (Mao et al., 2019) y el café (Cervera-Mata et al., 2021). De forma artificial, se pueden utilizar líquidos hidrofóbicos como decano, tetradecano, hexadecano, benceno o tolueno (Boglaïenko y Tansel, 2016); titanato y silano (Yue et al., 2018); dimetildiclorosilano (Zhou et al., 2021); ácidos grasos, como el ácido esteárico y el ácido oléico, debido a su cadena hidrofóbica y grupo carboxilo hidrofílico (Subedi et al., 2012) (Wijewardana et al., 2015). En fin, la hidrofobización de arenas es un tema de gran interés ingenieril pues sus aplicaciones son numerosas, por ejemplo la filtración de agua aceitosa (J. Liu et al., 2018) o en barreras capilares hidrofóbicas para sistemas de cobertura de rellenos sanitarios (Subedi et al., 2013).

Evidentemente, existe una gran variedad de agentes hidrofóbicos de origen sintético y de origen natural. Debido a esto se propone estudiar la posibilidad de elaborar arenas hidrofóbicas a partir de residuos sólidos disponibles en Costa Rica, como ácidos grasos extraídos del lodo de la producción de aceite de palma y vidrio borosilicato molido.

3.2. Materias primas

Vidrio borosilicato

El vidrio, en general, se compone de soda, silicato y caliza; a partir de esto se pueden agregar aditivos para variar sus propiedades y uso, como el caso del vidrio borosilicato (Jones y Ohlberg, 1991). El borosilicato se inventó agregando B_2O_3 y Al_2O_3 para manipular el punto

de congelación del silicato y producir un material más resistente a la corrosión y ruptura por choque térmico (George, 1936). Estas características la hacen muy útil en muchos ámbitos, como la cocina y los laboratorios, sin embargo, su resistencia a temperaturas altas la hace muy difícil de reciclar (George, 1936).

Utilizar vidrio borosilicato como materia prima para fabricar arenas sintéticas es posible ya que se determinó, en un estudio realizado por Wartman et al. (2004), que cuando se muele el vidrio, sus propiedades físicas se asemejan a agregados naturales. Si bien el vidrio molido, a diferencia de otras partículas de arena, tiene una formación angular, esto no parece producir efectos significativos en su utilidad en la construcción o ingeniería geotécnica (Wartman et al., 2004).

En cuanto a riesgos a lixiviación de contaminantes, se encontró que utilizar vidrio molido en la construcción no produce cantidades medibles de lixiviados en el suelo (Wartman et al., 2004). En otro estudio se comprobó que la lixiviación de contaminantes a partir de vidrio molido es insignificante, además, no se sobrepasan los límites establecidos por la EPA de pH, conductividad, cloro, sulfato y surfactantes (Imteaz et al., 2012).

Lodo del proceso de extracción de aceite de palma

El aceite de palma se produce a partir del mesocarpio de la fruta de la especie *Elaeis guineensi* (O. Lai et al., 1995). Es uno de los aceites de origen vegetal más populares del mundo, con una producción total mundial de $69,98 \cdot 10^6$ toneladas de aceite en el año 2017-2018 (O. Lai et al., 2020).

El aceite de palma está compuesto por triglicéridos, los cuales se conforman de una gran variedad de ácidos grasos. Lo que diferencia un ácido graso de otro es el número de carbonos que tiene en su cadena y si es saturada o insaturada. En general, el aceite de palma se constituye de 50% grasa insaturada y 50% de grasa saturada. Los ácidos grasos que contiene determinan sus propiedades físicas y químicas (O. Lai et al., 2020).

La producción de aceite de palma cambia en cada empresa o región, sin embargo, sigue un mismo proceso básico. Se comienza con la esterilización, luego se cocina para despegar los frutos del racimo, seguidamente se separa la fruta de la semilla y se prensa para obtener el

aceite crudo, el cual se purifica en un tanque clarificador donde se separa el aceite de las impurezas (O. Lai et al., 1995).

A lo largo del proceso, se producen múltiples residuos sólidos, los cuales, la empresa COOPEAGROPAL, valoriza reincorporándolos al suelo como mejorador de suelos. Sin embargo, se ha evidenciado que el lodo producido en el tanque clarificador podría provocar incendios y problemas de infiltración de agua en el suelo debido a su contenido de grasa residual.

3.3. Aplicaciones de arenas hidrofóbicas

Si bien la hidrofobicidad en el suelo se relaciona comúnmente con una baja infiltración, erosión y flujo preferencial; en el ámbito de construcción su capacidad para repeler agua puede ser muy útil (Beckett et al., 2016). Por ejemplo, en la construcción de vías, la infiltración de lluvia en el suelo provoca que el agua se acumule debajo de la capa impermeable de la calle, causando derrumbes o fallos (Zheng et al., 2017). Las arenas hidrofóbicas ofrecen la oportunidad de prevenir la entrada de agua en estas zonas (Zheng et al., 2017). Además, por ser un material particulado tiene mayor versatilidad de aplicación en el suelo, ya que se puede variar la cantidad de arena utilizada dependiendo de las necesidades hidráulicas de la obra.

Por otro lado, se ha descubierto la capacidad de arenas hidrofóbicas de filtrar y remover sustancias hidrofóbicas del agua. Liu et al. (2018) recubrieron arenas con ZnO y octadeciltriclorosilano, obteniendo hidrofobicidades muy altas, y al aplicarlo como un filtro en agua residual, descubrieron un aumento drástico en la remoción de aceite. Lo mismo fue estudiado por Yue et al. (2018) y Sun et al. (2021), utilizando distintos agentes hidrofóbicos. Por otra parte, Liu y Choi (2021) estudiaron el efecto de arenas hidrofóbicas en la evaporación del agua en lagunas, cuando las arenas flotan, generan una barrera física y química para las moléculas de agua, por ende disminuyendo significativamente su evaporación.

Pueden ser utilizadas también como barreras capilares en suelos, comúnmente referidos como barreras capilares hidrofóbicas. Su uso en suelos es variado: barreras en rellenos sanitarios para prevenir la lixiviación de agua contaminada, jardinería, agricultura y redistribución de agua (Lowe et al., 2021; Saenz, 2009; Subedi et al., 2013; Zyga, 2009).

Barrera capilar

Las barreras capilares se construyen mediante capas de suelo con propiedades hidráulicas distintas, donde ocurre un proceso que restringe el movimiento del agua gravitacional (Solanki et al., 2016). Consisten en una capa de suelo fino sobre una capa de partículas gruesas, donde las fuerzas capilares de la capa fina son mayores a las de la capa gruesa. La diferencia entre capilaridades provoca que se detenga la infiltración vertical en el momento en el cual el agua llega a la barrera (Solanki et al., 2016). Una forma de identificar este fenómeno es midiendo las curvas características de retención de agua para cada capa, donde la capa superior debe retener más agua que la capa inferior (Meerdink et al., 1996). En la Figura 1 se encuentra ilustrado el concepto aplicado en un relleno sanitario.

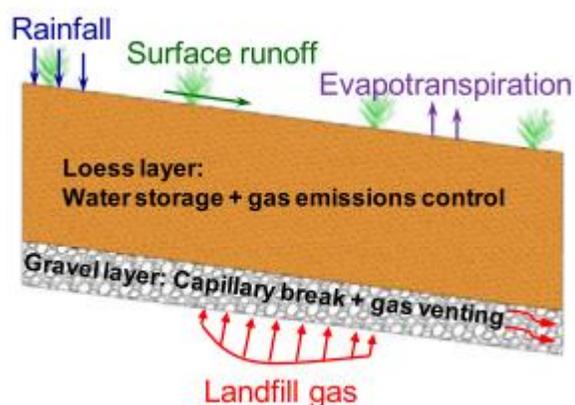


Figura 1. Diseño de una barrera capilar de loess y grava para rellenos sanitarios

(Zhan et al., 2020)

Existe un punto en el cual la barrera deja de funcionar y el agua comienza a infiltrarse, esto sucede cuando la conductividad hidráulica de ambos suelos se igualan (Solanki et al., 2016). Lo anterior depende de las entradas y salidas de agua porque, para que suceda, la capa de partículas finas debe acumular mucha agua (Khire et al., 2000). Las barreras capilares son comúnmente utilizadas en rellenos sanitarios como coberturas para evitar la infiltración de agua y generación de lixiviado en el subsuelo (Zhan et al., 2020).

Por otro lado, las barreras capilares hidrofóbicas utilizan la misma lógica que las barreras capilares, solo que aumentan la diferencia de fuerzas capilares entre las capas. Lo anterior se

logra hidrofobizando la capa gruesa de la barrera, por lo que, según el modelo de ascenso capilar, se reducen sus fuerzas capilares. La hidrofobicidad también reduce la capacidad de infiltración en la barrera, aumentando así su efectividad en prevenir el movimiento vertical del agua hacia el subsuelo.

Aplicaciones de barreras capilares en suelo

Subedi et al. (2013) diseñaron barreras capilares hidrofóbicas para coberturas de rellenos sanitarios utilizando ácido esteárico y ácido oléico. Los resultados obtenidos mostraron que los recubrimientos alcanzaron ángulos de contacto máximos de 101° para ácido oléico y 108° para ácido esteárico; además, las curvas de retención presentaron cambios bruscos en contenido de agua volumétrica en el punto de entrada de aire (Subedi et al., 2013). Dichos resultados indican que las arenas hidrofóbicas aplicadas como barrera capilar pueden detener la percolación de agua de manera efectiva (Subedi et al., 2013). Zheng et al. (2021) amplían la investigación realizada por Subedi et al. (2013) comparando el balance de agua en una barrera capilar tradicional y en una hidrofóbica, mediante una prueba, a escala de laboratorio, aplicando lluvia artificial. Para la barrera capilar hidrofóbica, la percolación en la base de la capa, se mantuvo en 0 L/m^2 mientras que la barrera capilar tradicional alcanzó una percolación de 5 L/m^2 a los 150 minutos (Zheng et al., 2021). La hidrofobicidad de las arenas hace que la acción de la barrera sea más fuerte, por lo que su aplicación es más duradera y viable para climas áridos o tropicales.

En un suelo seco, la infiltración de agua de lluvia es rápida. Si es superior a la capacidad de almacenamiento, puede percolar y formar parte de la recarga de acuíferos. No obstante, parte del agua de recarga puede aprovecharse si se construye una barrera capilar hidrofóbica en el suelo, a poca profundidad (Choi et al., 2016). Es decir, aprovechar la intercepción del agua percolada que genera la barrera capilar hidrofóbica para la cosecha de agua (Lowe et al., 2021). Esta es una alternativa viable para cosechar agua en sitios con poca infraestructura impermeable y mucho suelo. Se han realizado estudios sobre la aplicabilidad de la tecnología y se ha comprobado que es eficiente y de bajo costo (DeBano, 1981; Meyers y Frasier, 1969). En la Figura 2 se puede observar un diagrama que ilustra este proceso.

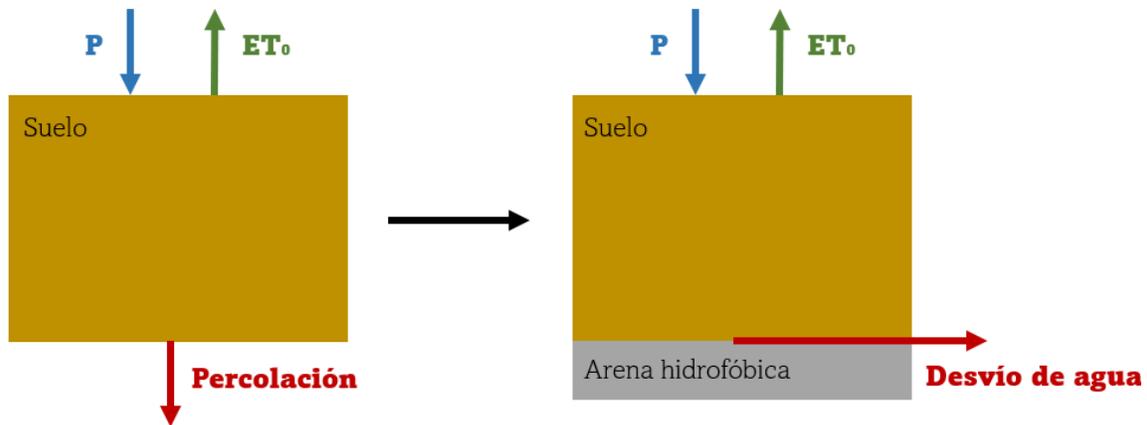


Figura 2. Diagrama de aprovechamiento de agua de lluvia por medio de una barrera capilar hidrofóbica
(Elaboración propia)

Una empresa Alemana DIME, patentó arenas hidrofóbicas para su uso en la agricultura en zonas desérticas (Saenz, 2009). No se tiende a asociar suelos hidrofóbicos con la optimización de la agricultura, debido a su efecto en las raíces y erosión del suelo. No obstante, aplicar una barrera capilar hidrofóbica por debajo del suelo generaría una tabla de agua en épocas de lluvia. La tabla permitiría que el agua se mantenga cerca de las raíces de los cultivos, por ende reduciendo la cantidad de agua necesaria para riego en hasta un 75% (Zyga, 2009).

Por otro lado, las barreras capilares hidrofóbicas pueden trabajar en conjunto con otras tecnologías de cosecha de agua, por ejemplo, la cosecha de agua atmosférica. Esta consiste en condensar agua del aire por medio de un gradiente de temperatura (Bautista-Olivas et al., 2011). En la Figura 3 se puede observar una fotografía de un ejemplo del sistema. En la imagen se observa que el agua fría pasa por mangueras, las cuales entran en contacto con el aire y la condensan. A profundidades altas, el suelo tiene una temperatura menor que la superficie por lo que una tabla de agua a cierta profundidad podría utilizarse para generar el gradiente de temperatura necesaria para condensar el aire (Alam et al., 2015). Es decir, circular el agua subterránea, fría, confinada por la barrera capilar hidrofóbica, hacia la superficie para condensar agua en el aire.



Figura 3. Cosecha de agua mediante condensación de aire
(Ruíz y Rimolo, 2021)

3.4. Hidrofobicidad y ángulo de contacto

La hidrofobicidad es el fenómeno que describe la repelencia del agua hacia una superficie de cierto material. Se mide por medio del ángulo de contacto entre una gota de agua y la superficie de un sólido, donde, si el ángulo se encuentra entre 0° y 90° hay una hidrofobicidad baja; y si es mayor a 90° hay hidrofobicidad alta (Goebel et al., 2011). El ángulo se mide directamente mediante un goniómetro, el cual permite colocar una gota sobre una superficie, tomar imágenes y luego procesarlas para medir el ángulo de contacto. En la Figura 4, se ilustra cómo se mide el ángulo en la interfaz sólido-líquido-aire.

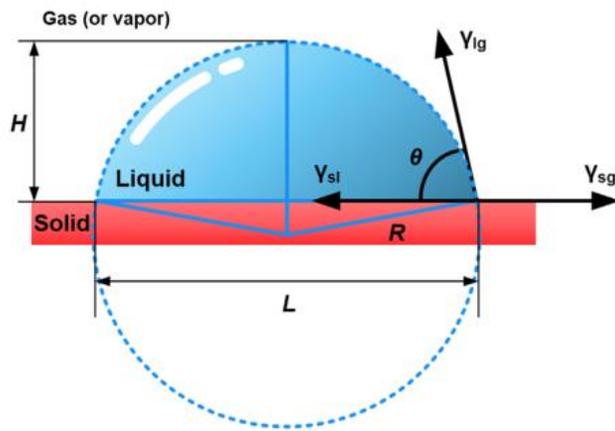


Figura 4. Ángulo de contacto de una gota con una superficie
(Hillel, 2004)

El ángulo de contacto, a su vez, se relaciona con la tensión superficial del líquido. Este el fenómeno que describe el comportamiento de la superficie de un fluido como una membrana elástica que causa que la superficie se contraiga a raíz de sus fuerzas cohesivas (Hillel, 2004). Cuando una gota de agua se coloca sobre una superficie, existen fuerzas cohesivas entre las moléculas del agua y fuerzas adhesivas entre las moléculas de la superficie y el agua. El ángulo de contacto es determinado a partir de la competencia entre dichas fuerzas, donde si las fuerzas adhesivas son mayores que las cohesivas, se obtiene un ángulo de contacto menor. Mientras que, si las fuerzas cohesivas son mayores, se obtiene un ángulo de contacto mayor.

Young expresó la relación entre la tensión superficial del sólido, el líquido y la tensión interfacial entre el sólido y el líquido, y el ángulo de contacto de una gota sobre una superficie sólida derivando la siguiente ecuación (Young, 1805).

Ecuación 1. Ley de Young

$$\gamma_s - \gamma_{sl} = \gamma_l \cos(\theta)$$

Donde:

γ_s : Tensión superficial del sólido [N/m]

γ_{sl} : Tensión interfacial entre el sólido y el líquido [N/m]

γ_l : Tensión superficial de líquido [N/m]

θ : Ángulo de contacto entre el sólido y el líquido [°]

Si bien la Ley de Young estableció las bases de la hidrofobicidad, solamente contempla superficies planas y homogéneas; lo cual no es el caso para partículas de suelo. Consecuentemente, surgieron nuevos modelos para describir el comportamiento entre un líquido y un sólido para superficies heterogéneas, como la Ley de Cassie-Baxter, la cual contempla la porosidad de la superficie sólida (Cassie y Baxter, 1944).

Ecuación 2. Ley de Cassie-Baxter

$$\theta = f_1 \cos(\theta_A) - f_2$$

Donde:

θ : Ángulo de contacto aparente de avance o retroceso [°]

f_1 : Fracción de área total del interfaz sólido líquido [-]

f_2 : Fracción de área total del interfaz líquido aire [-]

θ_A : Ángulo de contacto de avance o retroceso [°]

3.5. Ascenso capilar y la curva característica de retención de agua (CCRA)

El ángulo de contacto está vinculado a la retención de agua en el suelo por medio del fenómeno de capilaridad. Ya que la retención de agua en un suelo está gobernado por la capilaridad y la adsorción (Hillel, 2004).

Para estudiar dicho fenómeno, se simplifican los poros del suelo a tubos capilares, y así comprender el movimiento capilar del agua en el suelo. Cuando en un tubo capilar hay agua, se forma un menisco cóncavo y este genera una diferencia de presión entre el líquido y el aire provocando que el líquido ascienda por el tubo capilar hasta que exista un equilibrio de presión (Hillel, 2004). La curvatura del menisco depende de la hidrofiliidad de la superficie del

cilindro. Cuando el ángulo de contacto entre la gota de agua y la superficie es mayor a 90° , se forma un menisco convexo que genera una diferencia de presión positiva ($P_{\text{líquido}} > P_{\text{atm}}$) ocasionando un descenso capilar (Beckett et al., 2016).

La altura del ascenso o descenso capilar se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 3. Altura de ascenso capilar

$$h_c = (2\gamma \cos \alpha) / g(\rho_l - \rho_g)r$$

Donde:

h_c : Altura de ascenso capilar [m]

γ : Tensión superficial del líquido [N/m]

α : Ángulo de contacto [$^\circ$]

ρ_l : Densidad del líquido [kg/m^3]

ρ_g : Densidad del gas [kg/m^3]

r : Radio capilar [m]

Por otro lado, la curva característica de retención de agua describe la relación entre el potencial mátrico en un suelo y su contenido de agua durante un proceso de secado. Se asocia el aumento en la succión con una disminución en el contenido de agua y existen varias ecuaciones para modelar este fenómeno, como el de Brooks y Corey, su modificación Campbell y van Genuchten (Hillel, 2004). La ecuación utilizada con mayor frecuencia es la de van Genuchten, Mualem (van Genuchten, 1980):

Ecuación 4. Modelo de retención de van Genuchten

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \Psi_m)^n} \right)^m$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

Donde:

θ : Contenido de agua volumétrica [cm^3/cm^3]

θ_r : Contenido de agua volumétrica residual [cm^3/cm^3]

θ_s : Contenido de agua volumétrica del suelo saturado [cm^3/cm^3]

α : Inversa del valor de entrada de aire [cm^{-1}]

Ψ_m : Potencial mátrico [-cm H_2O]

n y m : Parámetros de forma

En el proceso de secado, si se aplica una succión en un suelo saturado, llega a un punto en donde entra aire y el agua se desplaza. Dependiendo de la textura del suelo, entre otras cosas, el valor de succión necesario varía. En un suelo de partículas gruesas como la arena ($50 \mu\text{m}$ a 2mm), el valor de succión es bajo; es decir, que no se necesita un alto valor de succión para que entre aire y se desplace el agua. Por otro lado, en un suelo de partículas finas, como la arcilla ($< 2 \mu\text{m}$), el valor de succión necesario para desplazar el agua es alto (Hillel, 2004). Por lo que se diría que la arcilla tiene una mayor capacidad de retención de agua que la arena.

La ecuación de van Genuchten provee dos valores útiles en el análisis de la retención del agua de un suelo: α y n . Donde α es la inversa del valor de entrada de aire, por lo que en un suelo con mayor retención de agua, este valor es menor (van Genuchten, 1980). Por otro lado, n es una constante adimensional que describe la pendiente de la curva de retención una vez que se supera el valor de entrada de aire (van Genuchten, 1980). En un suelo con mayor retención de agua, este valor es bajo ya que se drenan los poros lentamente.

3.6. Precipitación efectiva

La precipitación efectiva se define como el agua disponible para utilizar, es decir la que queda almacenada en el suelo, a una profundidad cercana a las raíces (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura [FAO], 2013). Para actividades como la cosecha de agua es importante cuantificar este valor, ya que permitirá determinar cómo aprovechar las precipitaciones (Alim et al., 2020; Tagle Zamora et al., 2018). Depende fuertemente de la precipitación de la zona por lo que se deben medir datos diarios de precipitación. A continuación, en la Figura 5, se puede apreciar una ilustración de las variables presentes en el cálculo de la precipitación efectiva.

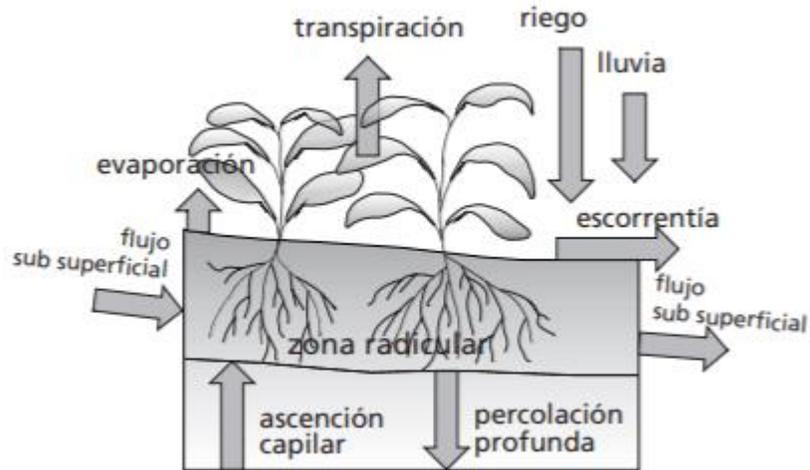


Figura 5. Variables de la precipitación efectiva en el suelo
(FAO, 2006)

La precipitación efectiva varía dependiendo de las características del sitio, ya que estas serán las que dicten las entradas y salidas de agua en el suelo. Por ejemplo, cuando hay poca lluvia, además de una cantidad reducida de entrada de agua, hay una mayor evaporación, por lo que también aumentan las salidas (FAO, 2013). Mientras que en condiciones de lluvia abundante, se supera la capacidad hidráulica del suelo y, en vez de infiltrarse el agua, se pierde por escorrentía; o el agua en suelo saturado sufre una escorrentía subsuperficial (FAO, 2013). En suelos secos, las entradas de agua no son útiles para las plantas porque el agua es retenida en el suelo con una alta energía (FAO, 2013). Para comprender mejor el balance hídrico del suelo, también es necesario comprender la capacidad de almacenamiento de este, el cual se conoce con la curva de retención de humedad.

Para determinar la precipitación efectiva, se realiza un balance de agua tomando en cuenta todas las entradas y salidas de agua del suelo. Una salida es la evapotranspiración, donde se pierde agua a través de la superficie del suelo hacia la atmósfera, y es la suma de la evaporación y la transpiración.

La evaporación es el cambio del estado de agua, en el suelo, a vapor en el aire. Mientras que la transpiración es la pérdida de agua por medio de los tejidos de las plantas, el cual depende de las características del cultivo y el clima. Ambas suceden de forma simultánea (FAO, 2006). Para calcular la evapotranspiración, se deben tomar en cuenta todas las variables que afectan ambos la transpiración y la evaporación.

La radiación es uno de los factores que más afectan la evapotranspiración y se relaciona con la energía del sol (Hillel, 2004). La radiación depende, a su vez, de la radiación de onda corta y del albedo (FAO, 2006). El albedo es un valor que permite determinar la fracción de radiación que se refleja de la superficie de la tierra y este varía para cada tipo de cobertura (Hillel, 2004). Por ejemplo, la nieve por ser blanca, refleja mucha radiación y por ende tiene un albedo de 0,9, mientras que las coberturas tienen un albedo de 0,2 (FAO, 2006). El albedo permite determinar la radiación neta, es decir, la radiación que realmente incide sobre el suelo y los cultivos.

La temperatura del aire es una medición de su energía. Cuando el aire tiene una alta energía, hay más evapotranspiración (FAO, 2006). La humedad relativa determina la diferencia de presión de vapor entre el aire y el suelo, por lo que a una humedad baja, hay una mayor evapotranspiración (FAO, 2006). El viento tiene un efecto parecido a la humedad relativa, ya que el viento reduce el vapor de agua cerca de la superficie, aumentando así la diferencia de presión de vapor, ocasionando que haya una mayor evapotranspiración (Hillel, 2004). Finalmente, el tipo de cultivo en el suelo afecta el albedo, que a su vez afecta la evaporación, y dependiendo del tamaño de sus hojas, estomas y altura tendrá una transpiración diferente (FAO, 2006).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales y métodos utilizados para obtener los resultados de esta investigación se describen a continuación. Se comenzó con la valorización de residuos sólidos para su uso como materia prima, seguido por la síntesis y caracterización de las arenas hidrofóbicas, la caracterización del suelo del sitio de estudio y, finalmente, el estudio de caso de la aplicabilidad de la tecnología para la cosecha de agua en Isla Caballo.

Objetivo 1: Examinación de la transformación de residuos sólidos del lodo de aceite de palma y vidrio borosilicato en arenas hidrofóbicas.

4.1. Extracción de materia prima

Extracción de grasa residual

Se realizó una extracción líquido sólido de grasa residual a partir del lodo residual (GLAP) generado en la fase final de la producción de aceite de palma de la empresa COOPEAGROPAL, específicamente en el proceso de clarificación. Se utilizó hexano como disolvente orgánico.

El lodo se almacenó a una temperatura de aproximadamente 6 °C para evitar la fermentación. Para la extracción de la grasa, se agregó 1,25 mL de hexano por cada gramo de lodo tratado a un tubo “falcon” y se revolvió los contenidos con una espátula para romper el lodo. Posteriormente, se vortearon las muestras por 1 minuto con un vórtex marca “Four E’s Scientific” y se agitaron por una hora a 180 rpm en un agitador orbital. Una vez concluida esta etapa de mezcla, se centrifugaron las muestras a 3500 rpm. Se decantó el hexano resultante y se repitió el procedimiento descrito anteriormente una vez más.

Se trasvasó el hexano a un embudo separador para eliminar la fase acuosa, en caso de que hubiese. Seguidamente, se filtraron los contenidos del embudo a un balón de fondo redondo con un papel filtro marca “Sartorius” (grado 393, diámetro 110 mm) y 10 g de sulfato de sodio anhidro.

Finalmente, la separación de la grasa y el hexano se realizó mediante un rotavapor marca “Heidolph”, donde el balón con hexano se sumergió en una tina de agua a 60 °C y se rotó a

200 rpm. Para evaluar el rendimiento de la extracción, se midió la masa de grasa recuperada en una balanza granataria marca “AE ADAM”. El vial con ácido graso se dejó reposar bajo la capilla de gases hasta enfriarse, donde pasó a tener una textura sólida, como se puede observar en la Figura 6.

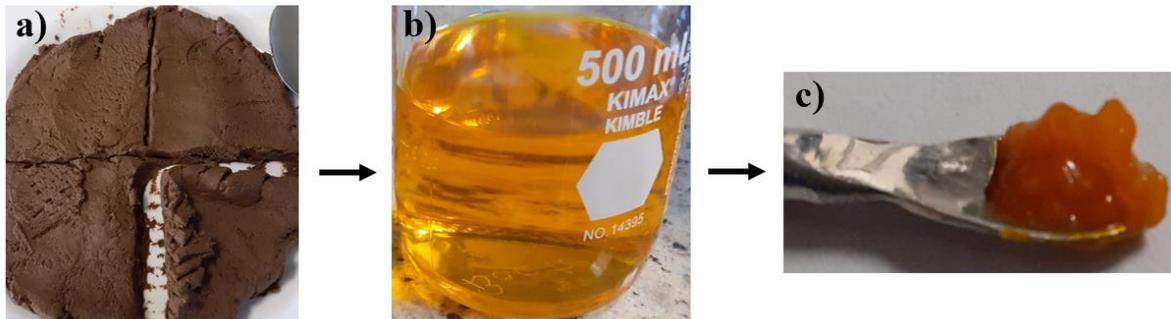


Figura 6. Proceso de extracción de la GLAP

(a) Lodo residual de aceite de palma (LAP); (b) Disolución de hexano con GLAP; (c) GLAP

En paralelo, se midió el contenido de agua gravimétrica del lodo pesando su masa antes y después de ser secado a 105 °C en una estufa por 24 horas. Esto se realizó por triplicado.

Producción de arena

La arena fue producida a partir de vidrio borosilicato proveniente de la cristalería rota en los laboratorios del CEQIATEC y el laboratorio de Ingeniería en Materiales. La cristalería fue transportada a VICESA, en Taras de Cartago, para su molienda, la cual fue realizada por la ingeniera María Badilla Sánchez de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

Primeramente, se rompió el vidrio utilizando un molino de mandíbulas y, seguidamente, se redujo su diámetro a aproximadamente 4 mm utilizando un molino de rodillos. Finalmente, las partículas obtenidas fueron introducidas a un molino de bolas donde se siguieron los parámetros descritos en las Cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Parámetros de molino de bolas.

Tiempo de residencia (min)	Vidrio insertado (kg)	Material de bolas
10	6	Fundación de hierro

Cuadro 2. Masa y número de bolas utilizadas en el molino de bolas.

Masa de bola (kg)	Número de bolas
0,50	6
0,75	5
1,00	3
1,50	4

Del total de arena producida, el 47% tiene el tamaño de partícula objetivo, la cual se puede observar en la Figura 7. En la Cuadro 3, se observa la distribución del tamaño de partículas obtenida de la molienda.

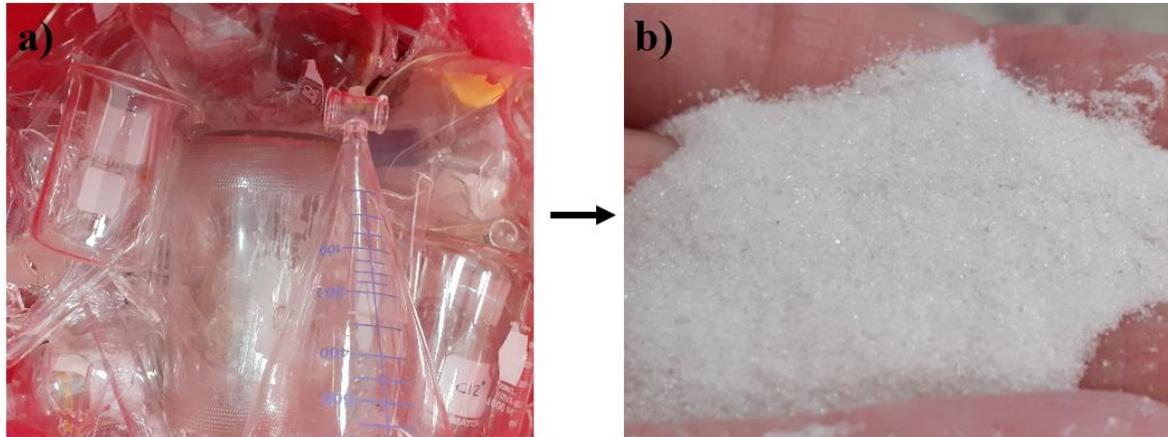


Figura 7. Arenas sintéticas retenidas en la malla N° 70

(a) *Borosilicato* y (b) *Arenas producidas*

Cuadro 3. Distribución de partículas de arena sintética resultado de la molienda de vidrio borosilicato.

N° malla	Diámetro de partícula (μm)	Masa retenida ($\pm 0,01$ g)
70	210	5754,44
80	177	197,38
100	149	2854,80
120	125	1675,72
140	105	1823,43
Total		12305,77

Distribución de partículas de arena

Se realizó una prueba granulométrica de tamices según la metodología de Sivagukan (2021). Se tomaron 3 muestras de 50 g de arena sintética sin recubrimiento. Se pasaron los 50 g de arena por 5 tamices, de mallas de 500 μm , 250 μm , 106 μm , 63 μm y 53 μm , en ese orden.

Posteriormente se pesaron los 5 tamices y la base para determinar los porcentajes de arena retenidos en cada tamiz.

Se calculó el porcentaje de arenas retenidas en cada tamiz con la siguiente ecuación:

Ecuación 5. Porcentaje de arenas retenidas por tamiz

$$\%retenido = \frac{M_{t+a} - M_t}{M_m}$$

Donde:

M_{t+a} : Masa del tamiz con arena retenida [g]

M_t : Masa del tamiz [g]

M_m : Masa de la muestra [g]

Seguidamente, se calculó el porcentaje de masa acumulada por diámetro de partícula. Luego se graficaron los puntos de porcentaje de masa acumulada en función del diámetro de partícula. Se procedió a utilizar el modelo de Rosin Rammler para modelar la curva de distribución de partículas (Vesilind, 1980). Finalmente, se calcularon los coeficientes del modelo mediante la función de solver en Excel y la suma de cuadrados del error.

Ecuación 6. Modelo de Rosin-Rammler

$$P(X < x)\% = 1 - e^{-\left[\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right]}$$

Donde:

$P(X < x)\%$: Porcentaje de masa retenida acumulada

x : Diámetro de partícula

α y β : Coeficientes del modelo Rosin Rammler

Ecuación 7. Suma de cuadrados del error

$$SSQ = \sum (Obs - Mod)^2$$

Donde:

SSQ: Suma de cuadrados del error

Obs: Valor observado

Mod: Valor modelado

Seguidamente, se calcularon los diámetros: D_{10} , D_{30} , D_{50} y D_{60} mediante la ecuación del modelo de Rosin-Rammler. Asimismo, se calcularon el coeficiente de uniformidad (C_u) y el coeficiente de gradación (C_c) mediante las siguientes ecuaciones (Day, 2010):

Ecuación 8. Coeficiente de uniformidad

$$C_u = \frac{D_{10}}{D_{60}}$$

Ecuación 9. Coeficiente de gradación

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

4.2. Recubrimiento de arenas y evaluación de hidrofobicidades

Se evaluaron 3 tipos de recubrimientos: ácido esteárico, GLAP mediante mezclado y GLAP mediante disolvente. Asimismo, se realizaron los recubrimientos a múltiples concentraciones.

Pretratamiento de arena

Antes de realizar los recubrimientos se efectuó un lavado de la arena sintética con agua y jabón para eliminar cualquier impureza que pudiera disminuir la adhesión del ácido graso en la partícula. Se ejecutaron enjuagues hasta que el agua tornara de gris opaco a transparente, como sucede en la Figura 8 Posteriormente, se enjuagó con agua destilada.



Figura 8. Limpieza de arenas

(a) Arena sin limpiar; (b) Arena limpia

Finalmente, para secar por completo la arena sintética, se introdujo a la estufa a 80 °C por 24 horas.

Recubrimiento con ácido esteárico

Para las arenas recubiertas de ácido esteárico (AE) se aplicó el ácido a concentraciones de 0,1, 0,3, 0,6, 1, 1,3 y 1,6 ($\text{g}_{\text{AE}}/\text{g}_{\text{arena}}$), cada una por duplicado, mediante la metodología de Subedi et al. (2013) que utiliza éter anhidro como disolvente. Se disolvió ácido esteárico, según la concentración deseada, en un beaker de 10 mL con éter anhidro. Seguidamente, se mezcló la disolución con 1,5 g de arena sintética y se trasvasó a un vidrio reloj donde reposó por 3 horas en una capilla de gases hasta asegurar que todo el éter anhidro se evaporó. Finalmente, se dejaron 48 horas en reposo en un desecador.

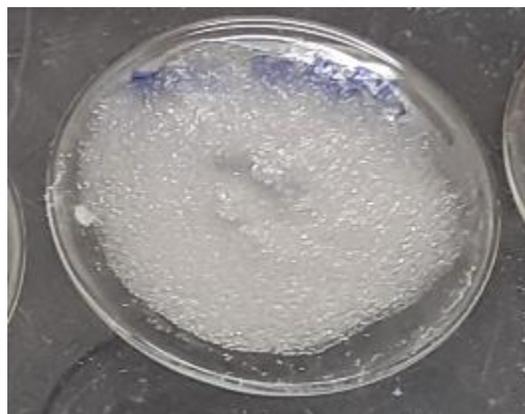


Figura 9. Arenas con disolución de ácido esteárico en reposo

Recubrimiento con GLAP

Igual al ácido esteárico, se realizaron recubrimientos de GLAP de 0,1, 0,3, 0,6, 1, 1,3 y 1,6 ($\text{g}_{\text{LP}}/\text{g}_{\text{arena}}$), cada una por duplicado. Sin embargo, con el GLAP se utilizaron dos metodologías de recubrimiento: por mezclado y mediante disolvente.

4.2.3.1. Recubrimiento por mezclado

Para las arenas recubiertas de GLAP mediante mezclado (LP-M), se introdujo GLAP a una bolsa de plástico y luego se agregó 1,5 g de arena sintética. La bolsa se cerró y se mezclaron los dos componentes con los dedos hasta lograr heterogeneidad. Se trasvasaron las arenas a viales y se dejaron en reposo por 48 horas en una desecadora. Se repitió esta metodología utilizando distintas masas de GLAP para cada una de las concentraciones mencionadas previamente.

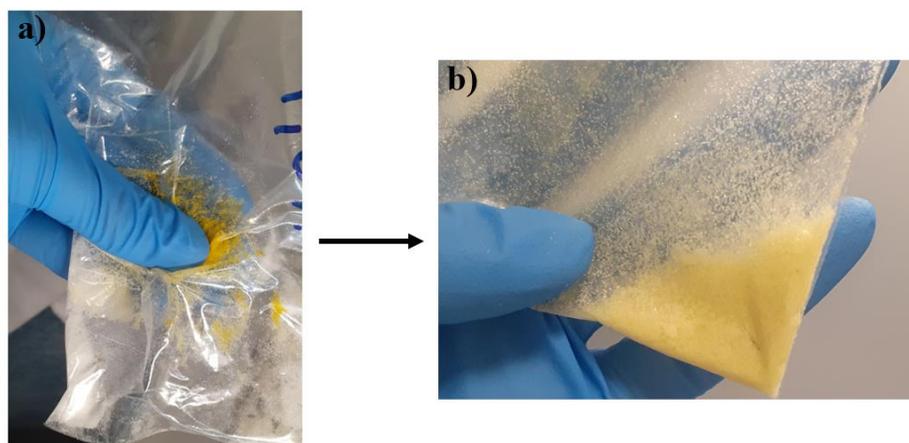


Figura 10. Mezclado de arena sintética con GLAP

(a) Proceso de mezclado; (b) Producto LP-M

4.2.3.1. Recubrimiento mediante disolvente

Para las arenas recubiertas de GLAP mediante disolvente (LP-D), se disolvió GLAP en un beaker de 10 mL con éter etílico. Seguidamente, se mezcló la disolución con 1,5 g de arena sintética y se trasvasó a un vidrio reloj donde reposó por 3 horas en una capilla de gases hasta asegurar que todo el éter anhidro se evaporó. Finalmente, se dejaron 48 horas en reposo en un

dsecador. Se repitió esta metodología utilizando distintas masas de GLAP para cada concentración mencionada previamente.

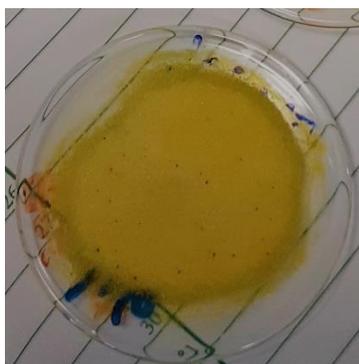


Figura 11. Arena sintética recubierta de LP mediante disolvente

Evaluación de hidrofobicidad

Se evaluó la hidrofobicidad del recubrimiento mediante la medición del ángulo de contacto inicial y su transcurso en el tiempo. Para ello se utilizó un goniómetro Ramé-Hart 500, el cual se compone de un foco que atraviesa la gota de agua, una plataforma que sostiene la muestra, una aguja que coloca la gota de agua, una cámara que captura la imagen y un software que permite medir el ángulo de contacto entre la gota y la superficie. El equipo se encuentra en la Figura 12.

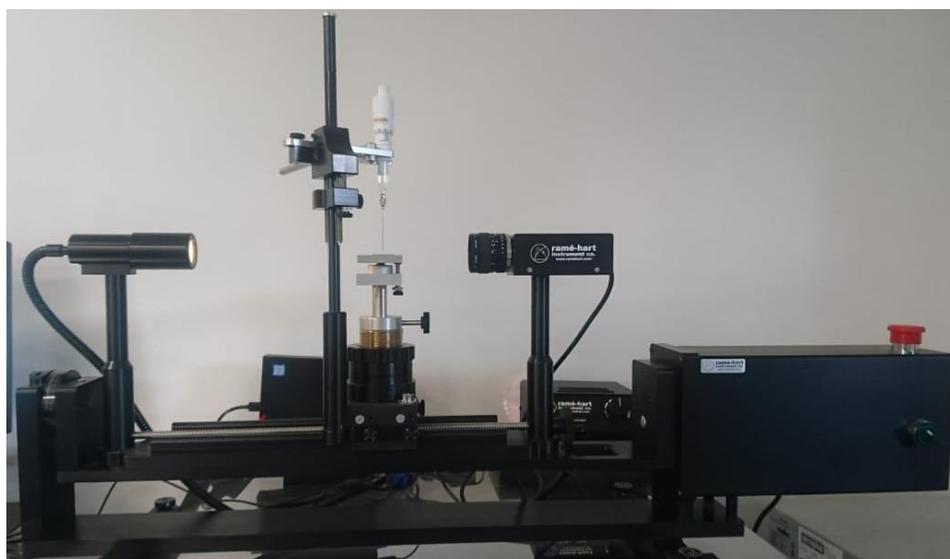


Figura 12. Goniómetro Ramé-Hart 500

Se preparó la muestra siguiendo la metodología de Bachmann (Woche et al., 2000) para la determinación de ángulos de contacto en partículas de suelo. Se cortó una cinta adhesiva de doble lado a 5,5 cm x 0,5 cm y se colocó en un portaobjetos de vidrio. Se aplicó arena hidrofóbica sobre la cinta hasta que quedase cubierta y se sometió a un peso de 100 g por 5 segundos. Luego, se quitó el exceso de arena de la cinta y se repitió el procedimiento una vez más.

Una vez lista la muestra, se comenzó la medición del ángulo de contacto a una temperatura ambiental aproximada de 20 °C. Se midió el ángulo de contacto en el tiempo cero y cada 3 segundos por 117 segundos. Se realizaron 7 repeticiones por muestra.

Evaluación de hidrofobicidad con la compactación

Seguidamente, para determinar la compactación en la cual se favorece la hidrofobicidad, se utilizaron dos densidades: 1,2 g/cm³ y 1,3 g/cm³, la mínima y máxima compactación posible en la cual la muestra no se desmorona. Esta prueba se realizó solamente en LP-M, por los resultados obtenidos en los ángulos de contacto y porque AE no se logró compactar.

Para la compactación se utilizó un contenedor y un pistón fabricados mediante una impresora láser. El contenedor cuenta con un diámetro de 2,000 cm, una altura de 1,544 cm y un volumen de 4,851 cm³. Se pesaron aproximadamente 5,8 g de arena para lograr la compactación inferior y 6,5 g de arena para la compactación superior. Utilizando el pistón y una espátula, se compactó y niveló la superficie de la arena, como se puede observar en la Figura 13.

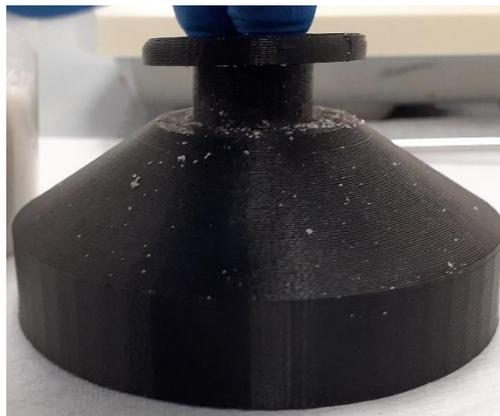


Figura 13. Equipo de compactación de arena LP

Una vez obtenida la compactación deseada, se utilizó el goniómetro Ramé-Hart para medir el ángulo de contacto en el tiempo cero y cada 3 segundos por 117 segundos. Se realizaron 5 repeticiones por muestra a una temperatura ambiental controlada de 20 °C. La prueba se realizó por duplicado.

Dicho procedimiento fue aplicado en arenas LP-M secadas al aire y secadas en la estufa a 105 °C por 24 horas.

Imágenes SEM

Para la toma de fotografías de la arena control, LP-M a 1 g/kg y AE a 1,6 g/kg se utilizó un microscopio electrónico de barrido TM3000 facilitado por el laboratorio de microscopía del Instituto Tecnológico de Costa Rica, sede central.

Previo a la toma de las imágenes las muestras fueron esparcidas como se observa en la Figura 14.

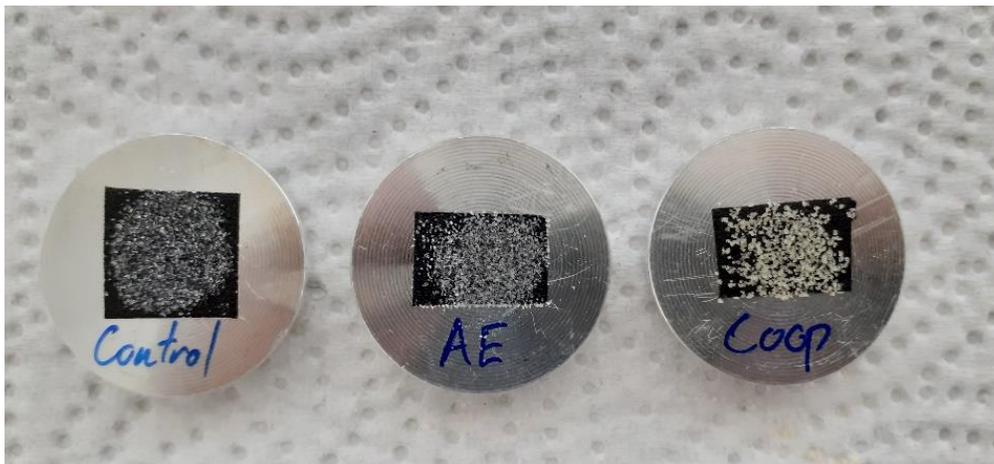


Figura 14. Preparación de muestras de arenas para la toma de fotografías SEM

Objetivo 2: Valoración del uso de arenas hidrofóbicas en barreras capilares hidrofóbicas para la cosecha de agua.

4.3. Parámetros hidráulicos de arenas hidrofóbicas

CCRA de arenas hidrofóbicas

Se construyó la CCRA de cada arena: control, LP-M y AE. Dicha curva abarca una succión desde 0 pF a 2 pF ($\log(-cm H_2O)$). Se realizó aplicando succión mediante una bomba de vacío, midiendo el cambio en masa de la muestra y midiendo el cambio en potencial mátrico con un tensiómetro.

Primero se construyó un tensiómetro a partir de una punta cerámica pequeña, una válvula de tres pasos y un manómetro de presión (PYLE). Dicho tensiómetro se puede observar en la Figura 15.



Figura 15. Tensiómetro

En el fondo del anillo se colocó una tela ajustada por una liga y, antes de comenzar la prueba, se saturó la muestra. En el caso de las arenas hidrofóbicas, fue necesario aplicar una columna de agua de aproximadamente 6 cm para lograr la saturación. También se agregó una malla con un cribado de 1mm para evitar que las arenas se suspendieran en el agua.

Por otro lado, el plato poroso de 0,5 Bar (high Flow) marca “Soil Moisture” se llenó sobre la balanza granataria.

Una vez que se saturó la muestra, se insertó el tensiómetro y se pasó al plato poroso. Inmediatamente se comenzaron a tomar los datos de peso y potencial mátrico de manera simultánea. En la Figura 16 se observa el sistema elaborado.



Figura 16. Equipo para la recolección de datos de la CCRA de las arenas hidrofóbicas

Para construir el modelo de la CCRA se utilizaron los datos obtenidos experimentalmente y se introdujeron al software RETC (van Genuchten et al., 1991) el cual utilizó el modelo de van Genuchten, Mualem (van Genuchten, 1980).

El software fue configurado para calcular los valores de θ_s , α y n , mediante un máximo de 50 iteraciones.

Conductividad hidráulica saturada

Se aplicó una metodología modificada de Reynolds et al. (2002) de cabeza de agua constante donde se aplicó una cabeza de agua de 3,5 cm y se pesó la masa de agua que se infiltró a través de la muestra de arena en el transcurso de dos minutos. Se realizó esta medición para la arena control, LP-M y AE. A continuación, se encuentra la ecuación que permite calcular el valor de K_{sat} .

Ecuación 10. Conductividad hidráulica saturada

$$k_{sat} [cm/min] = \frac{V \times L}{A \times \Delta h \times \Delta t}$$

Donde:

V : Volumen de agua que se infiltra en la muestra en dos minutos [cm^3]

L : Altura del cilindro con la muestra [cm]

A : Área del cilindro [cm^2]

Δh : Altura de la cabeza de agua [cm]

Δt : Tiempo de infiltración [min]

Para la elaboración de la curva de conductividad hidráulica en función del potencial mátrico, se introdujeron los valores de θ_s , α y n obtenidos de RETC (van Genuchten et al., 1991) y el valor de K_{sat} experimental en Hydrus 1D (Simunek et al., 2018).

4.4 Sitio de estudio y muestreo

El estudio de caso de aplicación de la barrera capilar hidrofóbica fue realizado para la Isla Caballo, ubicada en el Golfo de Nicoya. En la Figura 17 se puede observar su ubicación en Costa Rica.

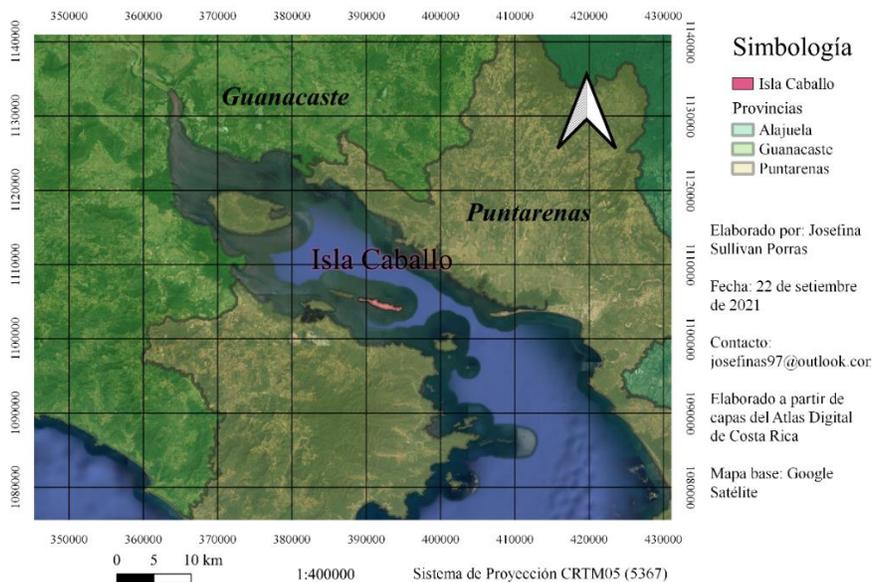


Figura 17. Ubicación de Isla Caballo en Costa Rica

Isla Caballo se ubica en el Golfo de Nicoya y tiene aproximadamente 250 habitantes divididos en 65 familias donde la mayoría son pescadores (Artizar y Carillo, 2016). En la isla hay dos asentamientos: uno en playa Coronado y otra en playa Torres (Quesada, 2010). Entre las instalaciones que tienen, hay un EBAIS, una iglesia, dos escuelas y un colegio.

El abastecimiento de agua es uno de los problemas predominantes para los habitantes ya que sufren de una escasez muy seria. Tienen 10 pozos alrededor de la isla con agua contaminada y, en ciertos momentos del año, salada a causa de la intrusión salina (Artizar y Carillo, 2016). Asimismo, en la época seca del año, no se logra extraer agua del todo.

A raíz de esto, la Universidad Nacional ha realizado esfuerzos en mejorar las condiciones sociales y ambientales de la isla, incluyendo un sistema de cosecha de agua para abastecer el EBAIS (Cháves, 2019). Además, lidera el Programa Interdisciplinario de Desarrollo Costero de la Universidad Nacional (Núñez, 2019). Por otro lado, en el 2016, el AyA comenzó a llevar 100 pichingas de agua de 20 L al día para abastecer a la comunidad tras un recurso de amparo (CRHoy, 2015). Aun así, los habitantes viven con mucha escasez de agua.

Para el estudio, se muestreó 5 kg de suelo suelto a nivel superficial, al lado de la escuela de Playa Torres en Isla Caballo, la cual se encuentra a aproximadamente 60 m de la costa.

4.5. Caracterización del suelo de Isla Caballo

Textura

Se calculó la clase textural del suelo por medio del método del hidrómetro de Bouyoucos siguiendo un método adaptado del descrito por Gee y Or (2002). El análisis fue realizado por triplicado. Por cada réplica, se pesaron 75 g de suelo, tamizados previamente utilizando un tamiz de 2 mm, y se secó a 105 °C por 24 horas en la estufa. Seguidamente, se eliminó la materia orgánica de la muestra agregando 45 mL de peróxido de hidrógeno al 30% y 30 mL de agua destilada. Esta se dejó reposar una noche y posteriormente, se calentó a 40 °C por 2 horas para asegurar la eliminación completa de la materia orgánica. Luego, se secó nuevamente en la estufa a 105 °C por 24 horas.

Al completar la eliminación de materia orgánica en el suelo, se tomaron 50 g de la muestra, se agregaron 200 mL de agua destilada y 10 mL de disolución de hexametáfosfato de sodio y se dejó reposando una noche. El día siguiente, se mezcló la muestra por 10 minutos y se trasvasó a una probeta de un litro.

Para comenzar las mediciones del análisis, se agitó la muestra durante 30 segundos para garantizar homogeneidad. Una vez finalizado, se tomó una lectura a los 40 segundos. Se repitió este proceso 3 veces. Luego, se tomaron lecturas a las 2 horas, 4 horas y 6 horas. En cada lectura se registró la temperatura de la muestra y una lectura de un blanco preparado previamente. Se utilizó la medición a 6 horas para el cálculo de contenido de arcillas.

Finalizadas las 6 horas, se realizó un tamizado en húmedo, en la cual se trasvasó la muestra a un tamiz de 53 μm y se enjuagó con agua hasta eliminar las partículas más finas (limos y arcillas). La muestra resultante, se secó a 105 °C por 24 horas y se pesó sus contenidos para realizar la corrección de proporción de arenas.

Para determinar las fracciones de arena fina, media y gruesa se realizó un tamizado en seco utilizando tamices de 500 μm y 250 μm .

Curva de distribución de partículas mediante datos del hidrómetro de Bouyoucos

Se generó una curva de distribución de partículas utilizando las mediciones a 2 horas, 4 horas y 6 horas del método de Bouyoucos, además de las fracciones de arena fina, media y gruesa mediante tamizado en seco.

Utilizando la Ley de Stokes (Stokes, 1819) se calculó el diámetro de partícula medido en el método de Bouyoucos a 2 horas, 4 horas y 6 horas, como se puede observar en la Cuadro 4.

Ecuación 11. Ley de Stokes

$$t = \frac{18\eta h}{(\rho_s - \rho_l)d^2 g}$$

Donde:

t : Tiempo [s]

η : Viscosidad del agua [kg/ms²]

h : Altura [m]

ρ_s : Densidad de partícula [kg/m³]

ρ_l : Densidad del líquido [kg/m³]

d : Diámetro de partícula [m]

g : Aceleración de la gravedad [m/s²]

Para determinar el valor de h correcto para la prueba de Bouyoucos, se utilizó la siguiente ecuación derivada por Gee y Or (2002):

Ecuación 12. Cálculo de altura de caída de partículas en la prueba de Bouyoucos.

$$h = L_1 + 1/2 \left[\frac{L_2 - V_B}{A} \right]$$

Donde:

h : Altura [cm]

L_1 : Distancia de la parte superior del bulbo a la línea de lectura [cm]

L_2 : Largo total del bulbo del hidrómetro [cm]

V_B : Volumen del bulbo [cm³]

A : Área transversal del cilindro de sedimentación [cm²]

Cuadro 4. Tiempo de sedimentación y diámetros de partícula calculados a partir de la Ley de Stokes.

Tiempo (h)	Diámetro (μm)
2	3,03
4	2,16
6	1,80

CCRA del suelo de Isla Caballo

La construcción de la CCRA se realizó midiendo succión y contenido de agua volumétrica de forma simultánea para un anillo de suelo. En este caso, el suelo de la isla fue empacado en un anillo de acero. Se empacó siguiendo la metodología de pistón de Dane y Hopmans (2002), a una densidad aparente de 1,01 g/cm³. En la Figura 18 se puede observar el suelo empacado.



Figura 18. Suelo de Isla Caballo empacado

Una vez listo el anillo de suelo, la curva se construyó a partir de dos metodologías que abarcan distintas partes de la curva: la parte húmeda y la parte seca. Para la parte húmeda de la curva, que abarca succiones entre 0 pF y 2 pF, se empleó el método de “Hanging water column”

siguiendo la metodología descrita por Eijkelkamp Soil y Water (2019) utilizando equipo de elaboración propia. El sistema construido se puede observar en la Figura 19. Consiste en un sistema lleno de agua que conecta una muestra de suelo empacado con una marioneta por medio de un tubo de agua. Al desplazar la marioneta por debajo de la línea de equilibrio, se genera una presión de succión en cmH_2O equivalente a la distancia que se desplazó.

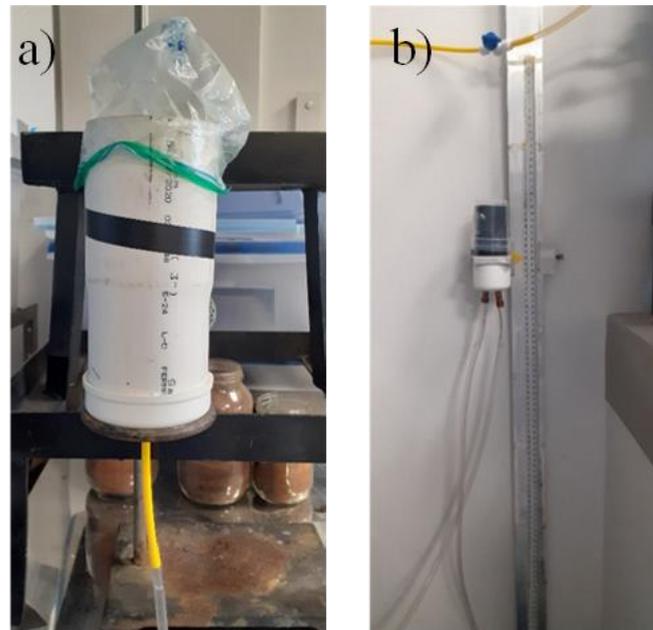


Figura 19. Equipo "Hanging Water Column"

(a) Columna de arena con la muestra y (b) Marioneta

Los puntos de la parte seca de la CCRA (3 pF-6 pF) fueron obtenidos empleando el equipo potenciómetro WP4C de Decagon Devices, el cual emplea el método de condensación en espejo y la ecuación de Kelvin para calcular el potencial mátrico del suelo. Se realizó un total de 5 mediciones con distintos contenidos de agua volumétrica. Se siguió la metodología descrita por Decagon Devices (Meter Group Inc, 2017) para la calibración, la preparación de la muestra y el uso del equipo.

Finalmente se utilizó el modelo de van Genuchten, Mualem (1980) para modelar la CCRA de agua con los datos obtenidos experimentalmente y el software RETC (van Genuchten et al., 1991).

Conductividad hidráulica saturada del suelo de Isla Caballo

Se determinó experimentalmente la conductividad hidráulica saturada por medio de una metodología modificada de Reynolds et al. (2002). Esta se describe con mayor detalle en el apartado “4.3.2. Conductividad hidráulica saturada” de este informe.

Posteriormente, se introdujeron los datos de la curva de retención de agua y la K_{sat} en Hydrus 1D (Simunek et al., 2018) para obtener una curva de K_{sat} (cm/h) en función de la succión en unidades de pF (- cmH₂O).

4.6. Datos meteorológicos

El cálculo de la precipitación efectiva para Isla Caballo se realizó con datos de estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional. Mediante dos estaciones dentro del Golfo de Nicoya (Figura 20) se aproximaron los valores de precipitación, temperatura y humedad de la zona. Los valores de temperatura y humedad para el cálculo de evapotranspiración potencial fueron tomados de la estación en Paquera; mientras que los de precipitación se tomaron en la estación en Lepanto. La Cuadro 5 detalla la información de cada una.

Cuadro 5. Información de estaciones meteorológicas utilizadas.

Información	Paquera	Lepanto
Latitud Norte	09° 49´	09° 58´
Longitud Oeste	84° 56´	85° 02´
Altitud (msnm)	10	50
Periodo	01/01/2016 - 31/12/2020	01/01/2016 - 31/12/2020

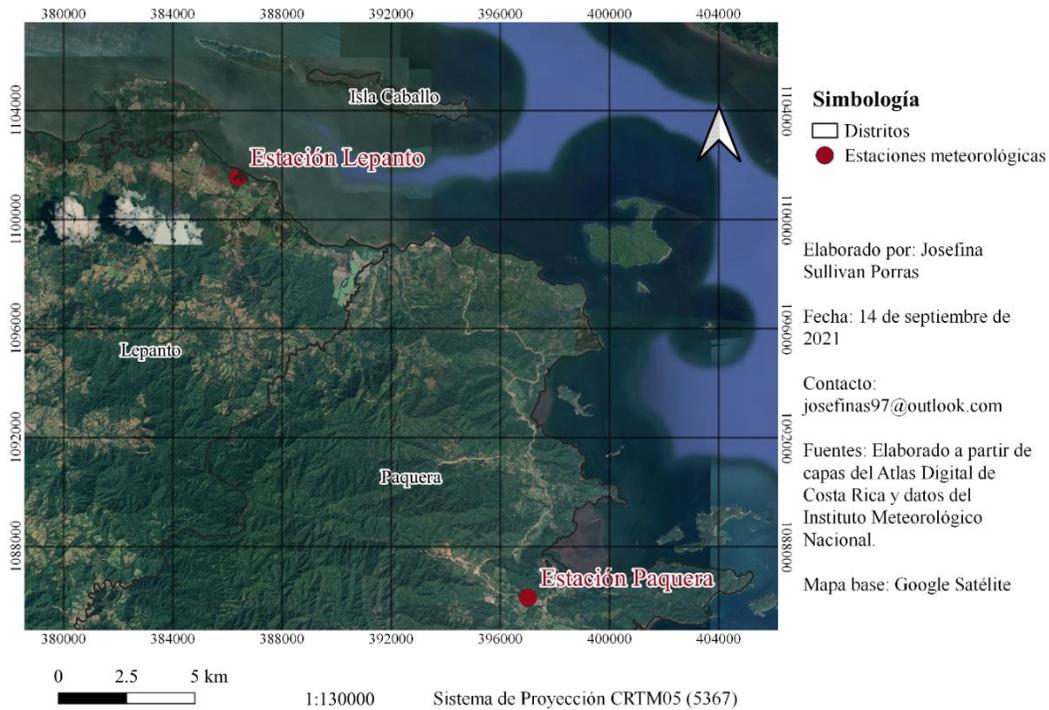


Figura 20. Ubicación de estaciones meteorológicas

Cálculo de evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial se calculó mediante el “ETo Calculator” de la FAO. Esta utiliza datos de humedad, temperatura máxima y temperatura mínima en la ecuación FAO Penman-Monteith (FAO, 2006). Se logró calcular la ETo promedio para cada mes del año.

Ecuación 13. FAO Penman-Monteith

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Δ : pendiente de la curva de la tensión de vapor saturado (kPa/ °C)

R_n : radiación neta sobre la superficie del cultivo (MJ/ m² día)

G : flujo calórico utilizado en el calentamiento del suelo ($\text{MJ}/\text{m}^2 \text{ día}$)

γ : Constante psicrométrica ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)

u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura, en m/s

$e_s - e_a$: déficit de tensión de vapor (kPa)

T : temperatura media del aire ($^\circ\text{C}$)

Cálculo de precipitación efectiva

Para calcular el balance de agua aproximado en el suelo de Isla Caballo, se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 14. Precipitación efectiva

$$P.ef = P - ET_0$$

Donde:

$P.ef$: Precipitación efectiva (mm/mes)

P : Precipitación (mm/mes)

ET_0 : Evapotranspiración potencial (mm/mes)

4.7. Estudio de caso en Isla Caballo

Para la elaboración del estudio de caso de la aplicación de una barrera capilar hidrofóbica a partir de las arenas hidrofóbicas fabricadas, se utilizaron datos meteorológicos y parámetros hidráulicos del suelo del sitio.

Datos meteorológicos empleados

Se decidió realizar estudios de caso en épocas del año en el cual la lámina de agua neta de la zona supera los 100 mm totales al mes. A partir de esto, se escogieron dos épocas para cosecha de agua: mayo a junio y setiembre a octubre. La primera siendo la menos abundante y la segunda la más abundante.

Para el estudio de caso, se generaron datos diarios de precipitación y evapotranspiración a partir de los datos mensuales y un generador de números aleatorios. Se aseguró que los datos diarios de cada mes sumaran a la precipitación y evapotranspiración total/mes registradas en las estaciones meteorológicas. En el apéndice 1 se puede observar las Cuadros A.1.1. y A.2.2. con los datos de lluvia y evapotranspiración generados.

Infiltración acumulada sobre la barrera capilar hidrofóbica.

Para determinar la cantidad de agua que se infiltra en el suelo y alcanza la profundidad a la cual se ubica la barrera capilar hidrofóbica, se utilizó el software Hydrus 1D (Simunek et al., 2018). Se simularon un total de cuatro escenarios variando la profundidad y la época de cosecha. Se utilizaron profundidades de 20 cm y 50 cm.

Se introdujeron los parámetros de la ecuación de van Genuchten de la curva característica de agua y el valor de K_{sat} (mm/día). En la Cuadro 6 se detalla la configuración de las simulaciones, las cuales se mantuvieron constantes para los cuatro escenarios.

Cuadro 6. Configuración para simulación en Hydrus 1D.

Parámetro	Configuración
Unidad de distancia	mm
Unidad de tiempo	Día
Número de días	61 días
Máximo número de iteraciones	10
Modelo de curva característica de agua	van Genuchten-Mualem
Histéresis	No
Condiciones de límite superior	Presión atmosférica con escorrentía
Condiciones de límite inferior	Drenaje libre
Potencial mátrico inicial	-100 cm H ₂ O

4.8. Tratamiento estadístico

Prueba T

Para las pruebas de compactación, se realizó una prueba-*t* para determinar si había una diferencia significativa entre los ángulos de contacto iniciales a la compactación máxima y mínima. También se empleó para determinar si existía una diferencia significativa entre los ángulos de contacto iniciales de la arena seca al aire y seca a 105 °C por 24 horas.

Prueba de Hartley

Se comenzó realizando una prueba de Hartley para determinar si existía una diferencia significativa entre las varianzas. Dicha prueba se llevó a cabo con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$) donde la hipótesis nula y alternativa fueron:

$$H_0: \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = 1$$

$$H_1: \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \neq 1$$

En los casos en los que el valor *p* era mayor al α , se aceptaba la hipótesis nula, por lo que se confirmaba con un 95% de confianza que no había diferencia significativa. Por otro lado, si el valor *p* era menor al α , se rechazaba la hipótesis nula y se confirmaba con un 95% de confianza que sí había diferencia significativa.

Prueba t

Posteriormente, se realizó la prueba *t* para poblaciones independientes. El resultado de la prueba de Hartley se utilizó en la prueba *t*. La prueba fue realizada con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$) y a dos colas, por lo que la hipótesis nula y alternativa fueron:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

El valor *p* resultante se analizó de la misma forma que en la prueba Hartley.

Parámetros de calidad de modelos de van Genuchten

Para evaluar la calidad de los modelos generados mediante la ecuación de retención de agua de van Genuchten se utilizaron dos parámetros de calidad: raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de regresión (R^2).

Ecuación 15. Raíz cuadrada del error cuadrático medio

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_0 - x_m)^2}{N}}$$

Donde:

N : número de puntos

x_0 : Dato observado

x_m : Dato modelado

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Objetivo 1: Examinación de la transformación de residuos sólidos del lodo de aceite de palma y vidrio borosilicato en arenas hidrofóbicas.

Extracción de grasa residual a partir del LAP.

Se confirmó la posibilidad de extraer grasa del lodo residual del proceso de aceite de palma, la cual a temperatura ambiente tiene una consistencia sólida. A continuación, en la Figura 21, se observan los resultados en cuanto al rendimiento de dicha extracción. Se ilustra la cantidad de grasa extraída acumulada por cada kg de lodo tratado y el porcentaje de grasa total obtenida en cada extracción. Según los resultados obtenidos, el lodo tiene un contenido de agua gravimétrica de 82% y un contenido de grasa de 4,5%, es decir, en 1 kg de lodo se extraen 45 g de grasa. Adicionalmente, el 78% del GLAP se obtuvo en la primera extracción y el 96% en la segunda, por lo que con dos extracciones se reduce el uso del solvente orgánico por un tercio y se obtiene un rendimiento cercano al 100%.

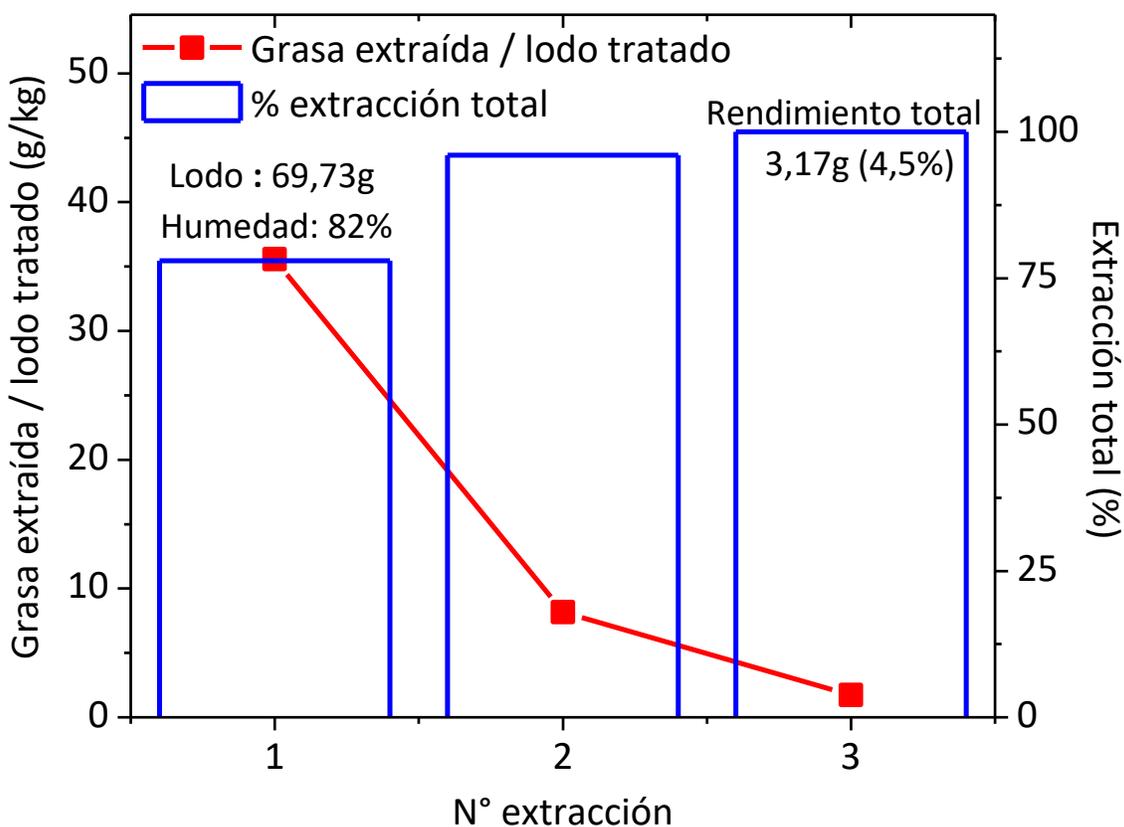


Figura 21. Proporción de grasa extraída del LAP por número de extracción

Distribución de partículas de arena sintética.

Del producto de la molienda de vidrio borosilicato, se separaron aquellas arenas que fueron retenidas en la malla número 70. Posterior al lavado de las arenas, se realizó otro tamizaje en seco para conocer con mayor precisión la distribución de partículas de las arenas sintéticas. La Figura 22 ilustra la curva granulométrica de la arena sintética en el eje-y primario y la curva de frecuencia de distribución de partículas en el eje secundario. Se observa que las partículas tienen un diámetro entre aproximadamente 100 μm y 200 μm . Según el modelo de Rosin-Ramler, el 100% de las partículas se encuentran por debajo de aproximadamente 210 μm .

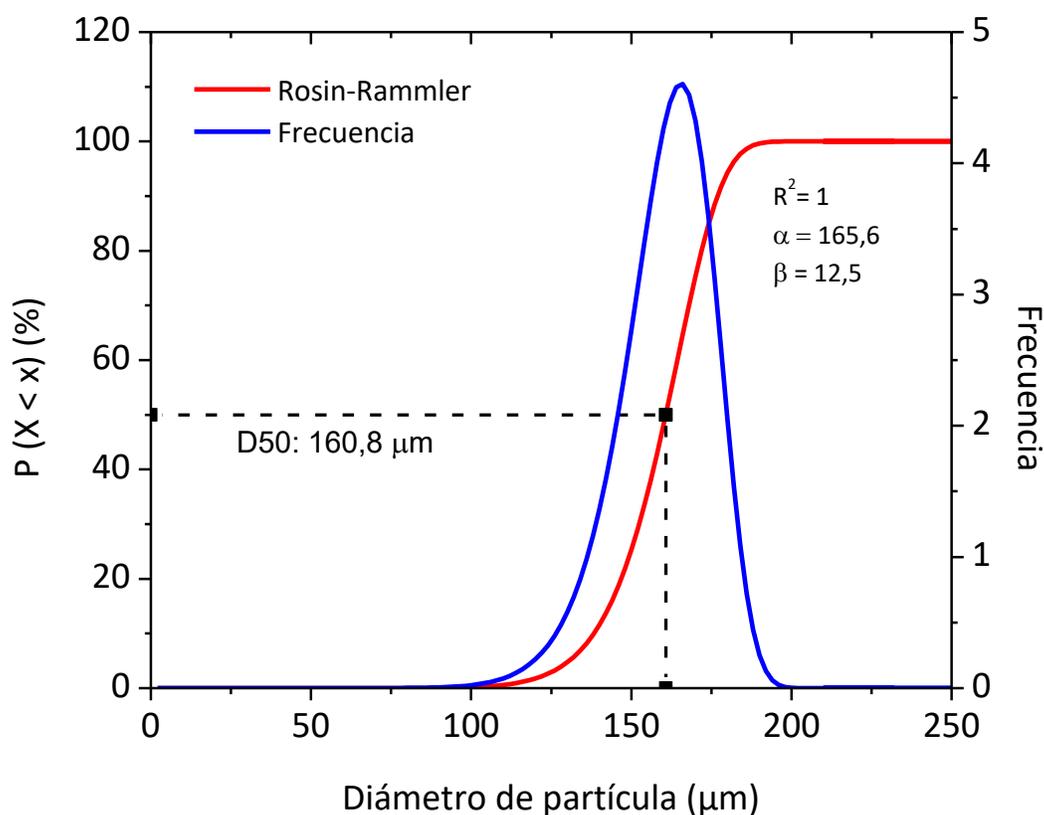


Figura 22. Curva granulométrica de arena sintética.

La Cuadro 7 presenta los valores de diámetros máximos de distintos porcentajes de partículas acumulados, el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de gradación (Cc). El 50% de las partículas de arenas tienen un diámetro igual o menor a 160,8 μm . Ambos, Cu y Cc, indican que tan graduadas se encuentran las partículas. El Cu se relaciona a la pendiente de la curva granulométrica y, por ende, indica qué tan uniformes son las partículas en cuanto a tamaño.

Las arenas tienen C_u cercano a 1 por lo que sus partículas tienen diámetros muy similares y por ende tiene una gradación uniforme (Day, 2010). El C_c , al no tener un valor entre 1 y 3, confirma la uniformidad de la arena (Day, 2010). Asimismo, en la Figura 22 se observa que el diámetro de mayor frecuencia y el D50 son muy parecidos, una característica usual en partículas uniformes. Dicha uniformidad refleja que la metodología utilizada para apartar cierto diámetro de partícula de interés fue exitosa. Esto, a su vez, permite mayor heterogeneidad en los recubrimientos de las partículas, ya que el tamaño de partícula y su respectiva área superficial influye en el proceso de adhesión de la grasa en la partícula de arena (Iley, 1991).

Adicionalmente, una uniformidad de tamaño de partícula indica un tamaño de poro uniforme, lo cual podría tener un efecto en la retención de agua de las arenas. Como lo describe el modelo de capilaridad para poros en el suelo, el tamaño del poro es inversamente proporcional a la altura de ascenso capilar y por ende las fuerzas capilares de la matriz. Se garantiza que, al aplicar una succión en la arena, todos los poros tendrán una entrada de aire similar, lo cual se podría manifestar como un descenso abrupto en la curva de retención de agua en el momento que entra aire en la matriz.

Cuadro 7. Diámetros y coeficientes de la curva de distribución de partículas de arena sintética.

D10	D30	D50	D60	Cu	Cc
μm					
138,3	152,5	160,8	164,4	1,2	1,0

La Figura 23 muestra fotografías de las arenas tomadas por un equipo SEM. Como se puede observar, las arenas tienen formas angulares que podrían afectar la capacidad de adherencia del ácido graso en la superficie de la arena (Morris et al., 2019).

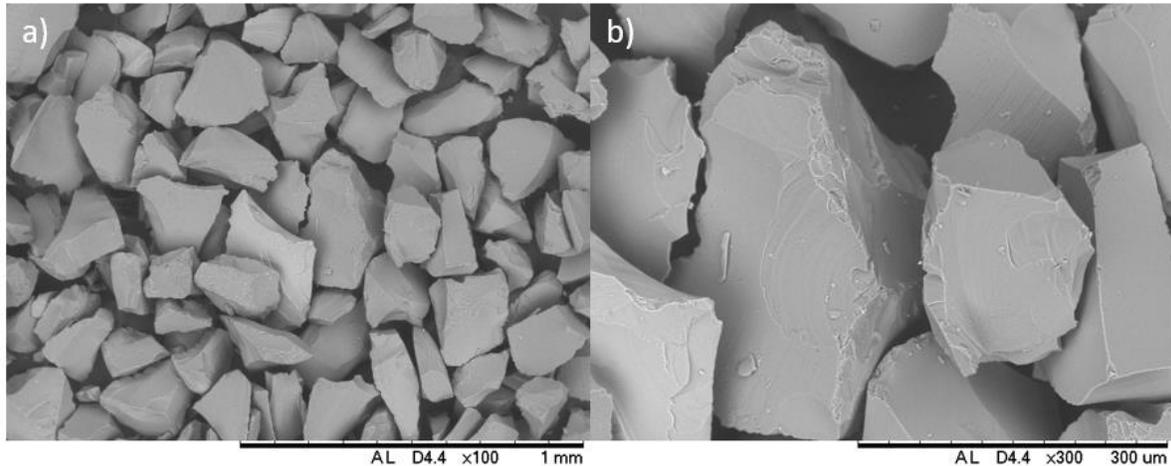


Figura 23. Fotografía SEM de arena sintética limpia

(a) 1mm y (b) 300μm

Ángulo de contacto de arenas hidrofóbicas.

Los resultados de los ángulos de contacto inicial de las arenas hidrofóbicas y la arena control se encuentran en la Figura 24. Hubo un aumento en el ángulo de contacto al recubrir las arenas con ácidos grasos. A partir de estos resultados, es evidente que el recubrimiento fue exitoso y efectivamente se reduce la energía superficial de la arena.

Para determinar si una superficie puede ser considerada como hidrofóbica, debe tener un ángulo de contacto superior a 90° (Israelachvili, 2011). Por un lado, la arena control tiene un ángulo de contacto inicial de cero, lo cual refleja un alto nivel de fuerzas adhesivas entre el agua y la arena. En el caso de las arenas recubiertas, AE alcanza un ángulo de contacto mayor a 90° a una concentración de 0,3 g/kg; mientras que en LP-M y LP-D se consideran hidrofóbicas desde una concentración de 0,1 g/kg.

El ángulo de contacto máximo de AE fue $107,48^\circ$ a una concentración de 1,6 g/kg; por su parte, LP-D y LP-M alcanzaron un ángulo de contacto máximo, a una concentración de 1 g/kg, de $118,83^\circ$ y $119,73^\circ$, respectivamente. Adicionalmente, en el caso de ambos LP, se evidenció una disminución en el ángulo de contacto inicial al realizar recubrimientos a concentraciones mayores a 1 g/kg. Por el contrario, Chan y Lourenço (2016) descubrieron que al aumentar la concentración de su agente hidrofóbico aumentaba el ángulo de contacto, sin embargo reportaron que el aumento fue mínimo. Por su parte, Wijewardana et al. (2015) observaron un fenómeno similar al reportado en esta investigación, donde el ángulo de contacto llega a un

valor máximo y posteriormente comienza a descender. Se considera que a cierta concentración se genera una capa múltiple provocando que la cabeza hidrofílica de la grasa se sitúe hacia el exterior de la partícula, consecuentemente disminuyendo la hidrofobicidad (Wijewardana et al., 2015). En el caso del ácido esteárico, González-Peñaloza et al. (2013) registraron un comportamiento parecido al obtenido en esta investigación, donde el ángulo de contacto inicial aumentó a medida que aumentaban la concentración, pero después de 1 g/kg el aumento se consideró poco significativo. Lo anterior sugiere que el fenómeno de capa múltiple no sucede en el caso de ácido esteárico, pero sí en el de GLAP.

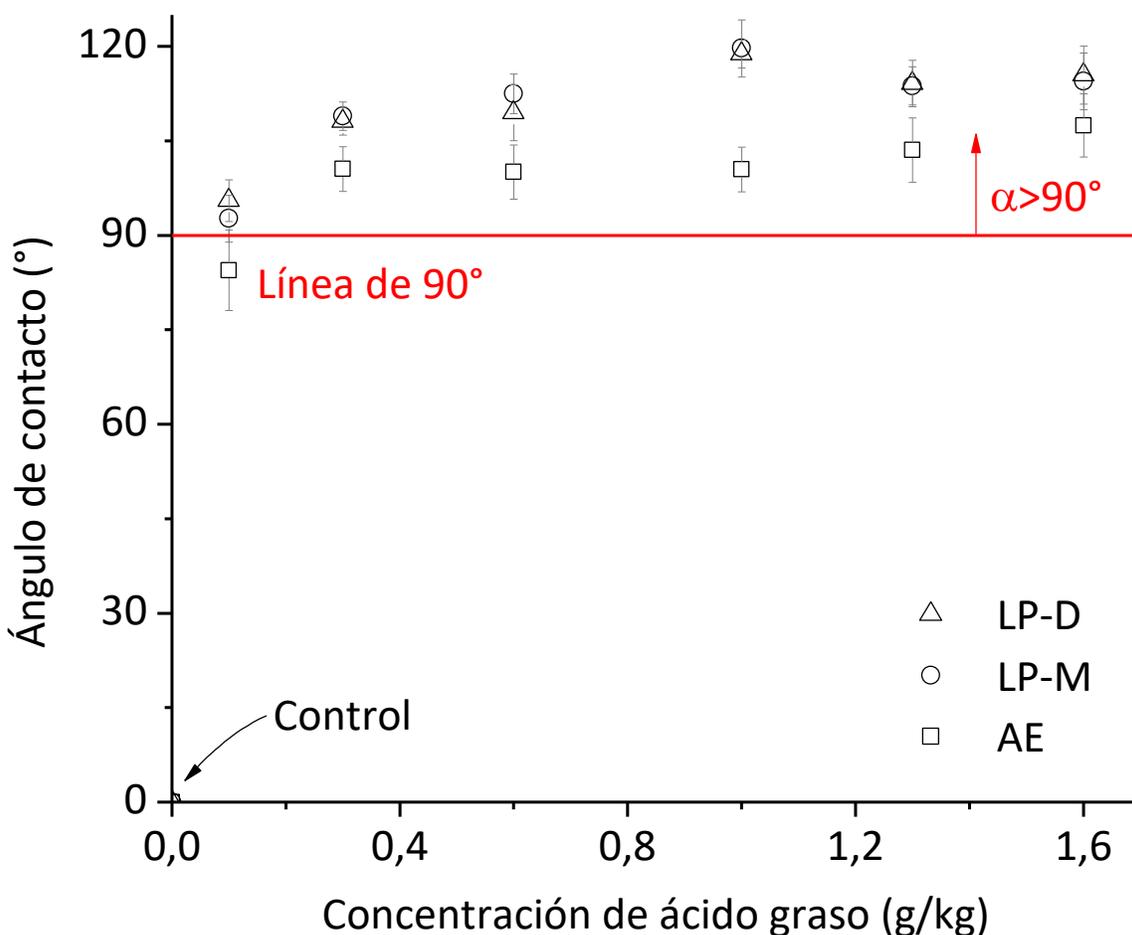


Figura 24. Ángulo de contacto inicial de arenas hidrofóbicas a distintas concentraciones de recubrimiento.

La Figura 25 presenta los datos de la variación en el ángulo de contacto en el tiempo para cada recubrimiento a distintas concentraciones. En el transcurso del tiempo del experimento, las partículas hidrofóbicas sufren una variación en su ángulo de contacto, provocado por interacciones entre las moléculas de ácido graso y el agua de la gota. Según Doerr et al. (2000), la atracción de las moléculas de agua hacia la cabeza polar del ácido graso debilita la adhesión del compuesto con la superficie de la partícula ocasionando que se separen, y consecuentemente se reduzca la hidrofobicidad.

La Figura 25a muestra la caída del ángulo de contacto en LP-M para cada concentración. El comportamiento de las curvas indica que a una concentración de 1 g/kg el ángulo de contacto tiene menor dependencia en el tiempo. Mientras que al disminuir o aumentar la concentración a partir de ese punto, aumenta la rapidez de la caída del ángulo de contacto. No obstante, la mayoría de las concentraciones obtienen resultados óptimos ya que a solamente 0,1 g/kg se observó una caída del ángulo más allá de la línea de 90°. Los resultados obtenidos permiten deducir que a 1 g/kg de recubrimiento se obtiene la mayor eficiencia de adherencia entre el GLAP y la superficie de la arena sintética.

En la Figura 25b se grafica una tendencia similar para LP-D, donde a una concentración de 1 g/kg la dependencia del ángulo de contacto en el tiempo es menor. Sin embargo, a diferencia de LP-M, a concentraciones de 0,1 g/kg y 0,3 g/kg el ángulo de contacto cae por debajo de la línea de 90° a aproximadamente 10 y 70 segundos, respectivamente.

Para el caso de AE, la Figura 25c muestra inestabilidad en la adherencia entre el ácido esteárico y la superficie de arena. Aún a la concentración máxima, a los 33 segundos se obtiene un ángulo de contacto inferior a los 90°.

Con el fin de comparar la estabilidad máxima de hidrofobicidad de cada arena, se graficaron las curvas de ángulo de contacto en función del tiempo para LP-M y LP-D a 1 g/kg y AE a 1,6 g/kg (Figura 25d). Evidentemente, LP-M y LP-D tienen una estabilidad superior, sin embargo, se puede observar una diferencia pequeña entre ellas. Si bien LP-M y LP-D tienen un ángulo de contacto muy similar, a los 117 segundos LP-M y LP-D tienen ángulos de contacto más lejanos, de 110,32° y 106,03°, respectivamente. Dicha tendencia permite determinar que el método de mezcla es óptimo para lograr adherencia de la capa de GLAP a la partícula de arena.

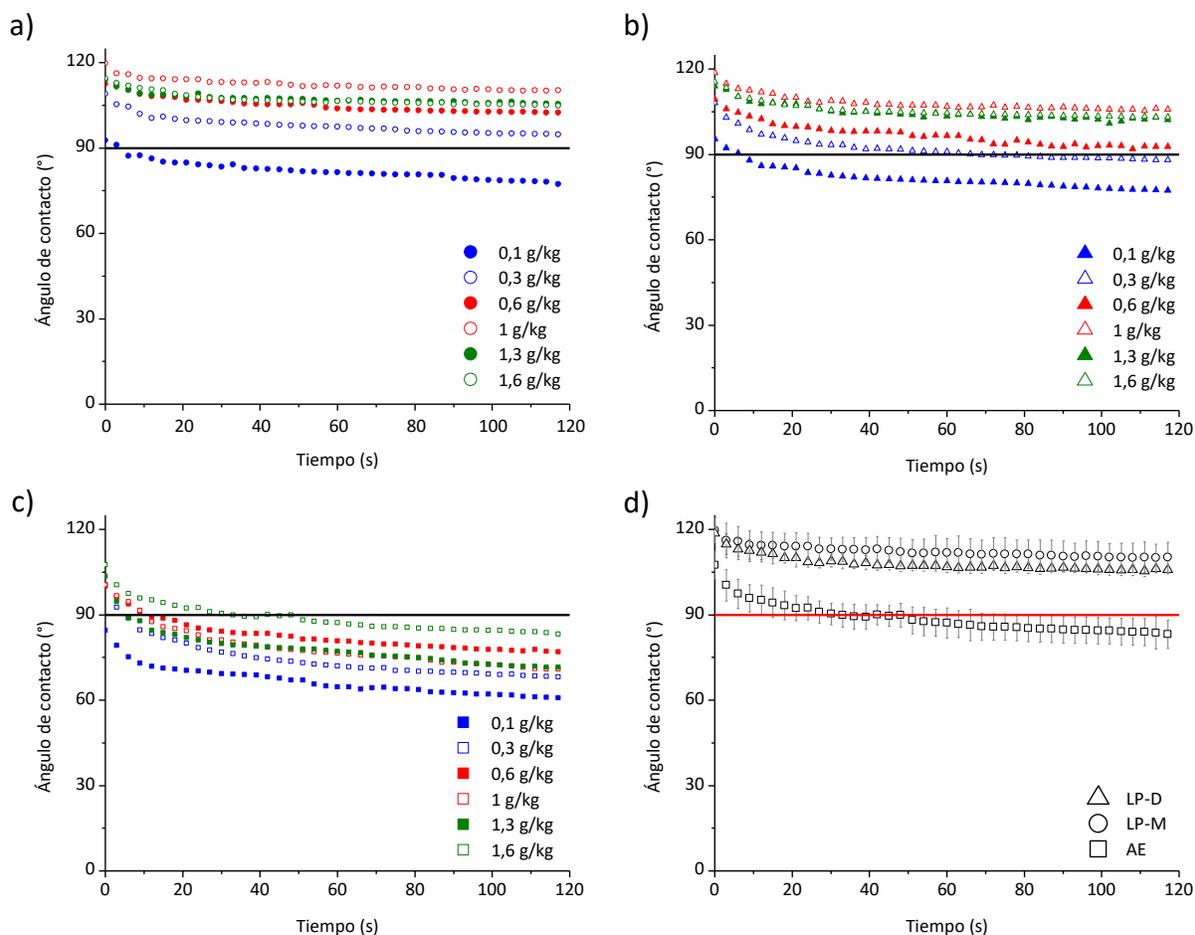


Figura 25. Variación del ángulo de contacto en el tiempo de recubrimientos
(a) LP-M; (b) LP-D; (c) AE y (d) Concentraciones óptimas de cada arena.

A partir de los resultados descritos anteriormente, se determina que LP-M tiene una hidrofobicidad superior a LP-D y AE en cuanto al ángulo de contacto inicial y su estabilidad en el tiempo. Debido a esto, la investigación posterior se realizó enfocándose en LP-M en comparación con AE, utilizado como referencia estándar.

En la Figura 26 se presentan imágenes de los recubrimientos de ambos LP-M y AE. Evidentemente, para LP-M la capa de recubrimiento es delgada y es fácil observar manchas correspondientes a sitios de concentración alta de GLAP. En el caso del AE, se observa que este se adhirió en segmentos, no como una capa suave y continua, lo cual podría explicar su

bajo rendimiento en las pruebas de ángulo de contacto. Se considera que la angularidad de la geometría de las arenas sintéticas provoca este fenómeno.

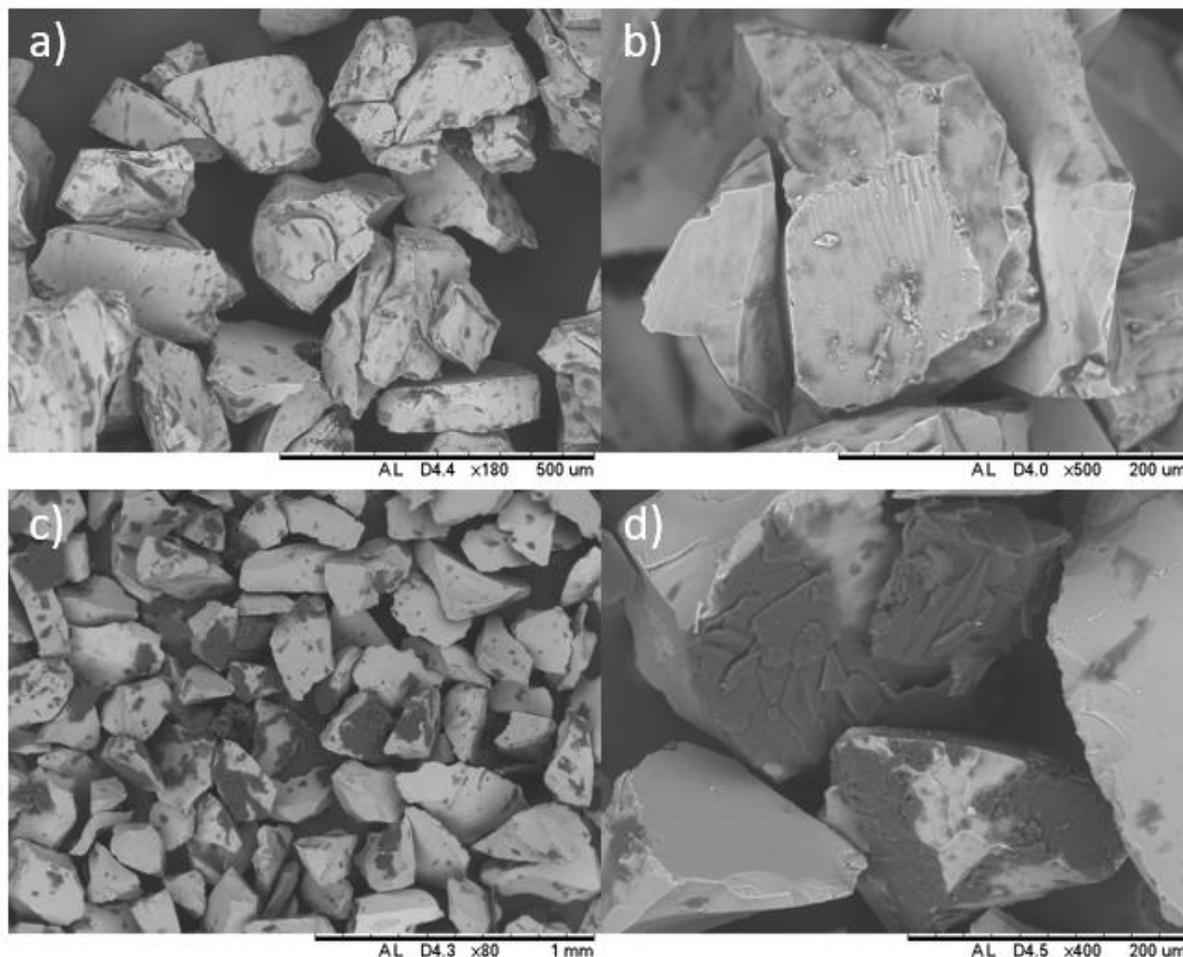


Figura 26. Imágenes SEM de arenas recubiertas de ácido graso

(a) LP-M a 500 μm ; (b) LP-M a 200 μm ; (c) AE a 1mm y (d) AE a 200 μm .

Efecto de compactación y calor en el ángulo de contacto de LP-M.

Los resultados del análisis de la variación en el ángulo de contacto a distintas compactaciones y métodos de secado se encuentran en la Figura 27 y la Cuadro 8. En la Cuadro 8 se detallan los valores de ángulo de contacto inicial de cada muestra y los resultados de la prueba-*t* comparando hidrofobicidad de arenas secadas al aire y al horno. A raíz de los valores-*p* de las pruebas, se concluye con un 95% de confianza que no existe una diferencia significativa entre los ángulos de contacto inicial de LP-M secada al aire y LP-M secada al horno. No obstante, es posible identificar la existencia de una tendencia a una hidrofobicidad levemente más baja

para arenas secadas a 105 °C por 24 h. Si bien al calentar la muestra se eliminan moléculas de agua, la temperatura podría estar generando un cambio químico en el GLAP reduciendo su hidrofobicidad.

Cuadro 8. Comparación de ángulo de contacto inicial de LP-M a distintas temperaturas de secado y compactación.

Densidad (g/cm ³)	Muestra	Ángulo de contacto inicial promedio (°)	Desviación estándar	Valor p
1,2	Seco al aire	114,9	3,9	0,359
	Horno a 105°C (24h)	112,8	5,7	
1,3	Seco al aire	114,7	5,5	0,180
	Horno a 105°C (24h)	112,0	2,2	

Por otro lado, la Figura 27, compara los ángulos de contacto obtenidos a distintos grados de compactación para LP-M secadas al aire y secadas al horno. Los valores-p en las gráficas corresponden a la comparación de ángulos de contacto inicial entre compactaciones de 1,2 g/cm³ y 1,3 g/cm³. Se confirma con un 95% de confianza que no existe una diferencia significativa entre los ángulos de contacto inicial de cada grado de compactación. Según la ecuación de Cassie-Baxter, la cual describe el ángulo de contacto en superficies porosas, entre mayor la fracción de aire en la superficie mayor el ángulo de contacto (Cassie y Baxter, 1944). Basándose en esta relación, se espera que a un menor grado de compactación se observe un mayor ángulo de contacto (Bachmann y McHale, 2009). No obstante, en este caso, al haber un cambio tan pequeño en la compactación y por ende fracción de aire, no se observó un cambio significativo en el ángulo de contacto.

En lo que respecta la dependencia de la hidrofobicidad en el tiempo, se observa que para la arena seca al aire (Figura 27a) las curvas se comportan de manera casi idéntica; mientras que para la arena seca al horno (Figura 27b), los ángulos de contacto son levemente menores a una compactación de 1,3 g/cm³ que a 1,2 g/cm³. Es posible que para arenas secadas al horno un cambio de compactación de 0,1 g/cm³ haya provocado un aumento significativo en la fracción

de aire de la superficie porosa y, por ende, según la ecuación de Cassie-Baxter, su ángulo de contacto aumentó levemente ($0,8^\circ$).

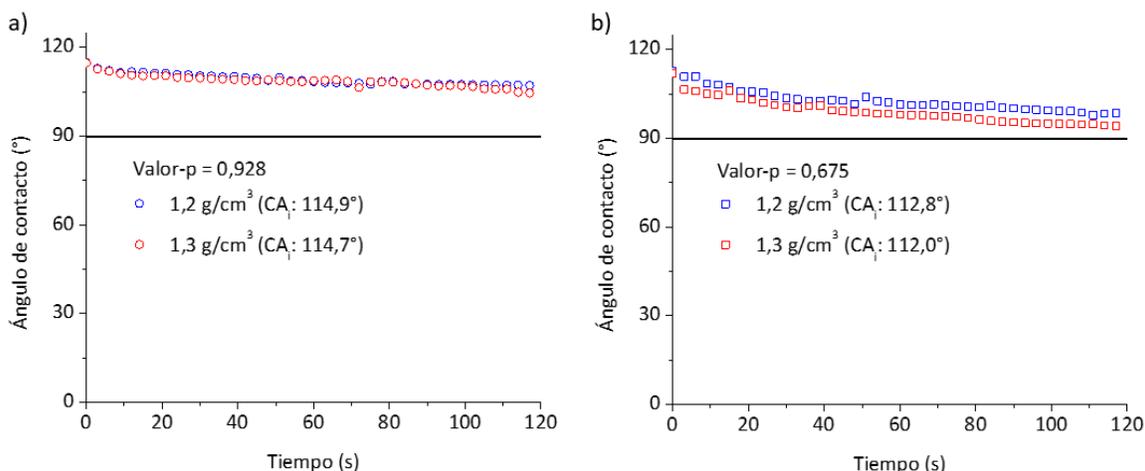


Figura 27. Ángulo de contacto de LP-M en el tiempo a distintas compactaciones
(a) LP-M seco al aire y (b) LP-M seco al horno

5.2. Objetivo 2: Valoración del uso de arenas hidrofóbicas en barreras capilares hidrofóbicas para la cosecha de agua.

Propiedades hidráulicas de la arena sintética y las arenas hidrofóbicas.

En la Figura 28a se observan las curvas características de retención de agua de LP-M, AE y el control. Se lograron ajustar los puntos obtenidos experimentalmente al modelo de van Genuchten con valores de R^2 de aproximadamente 0,99 y de RMSE menores a 0,002. En la Figura 28b se encuentran las curvas de conductividad hidráulica insaturada de cada arena, las cuales se calcularon por medio del modelo de van Genuchten y la conductividad hidráulica saturada experimental.

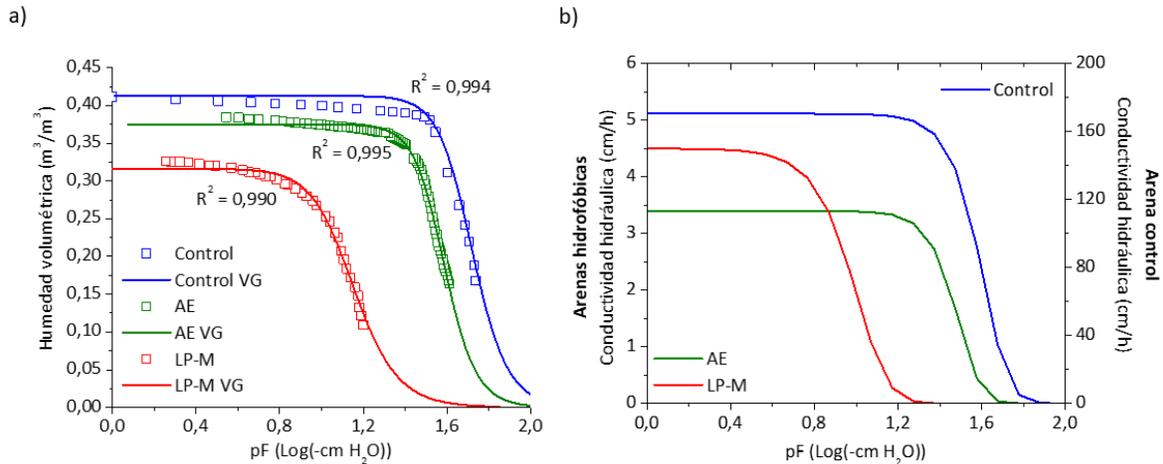


Figura 28. Propiedades hidráulicas de arena control y arenas hidrofóbicas

(a) Curva características de retención de agua y (b) Curva de conductividad hidráulica insaturada

Efectivamente, en lo que respecta la curva característica de retención de agua, se observó una deficiencia en la retención del agua en arenas hidrofóbicas en comparación con el control. Asimismo, se evidenció que la arena más hidrofóbica (LP-M) obtuvo la curva de menor retención de agua.

En las curvas características de retención de agua se observa que a una succión de 0,9 pF los poros de la arena LP-M drenan, mientras que el contenido de agua volumétrica de AE y la arena control se mantienen constantes. Seguidamente, a una succión de 1,5 pF comienzan a drenar los poros de AE. Mientras que para la arena se necesitó aplicar una succión de 1,6 pF para reducir su contenido de agua. Lo anterior muestra como al aumentar la hidrofobicidad de las partículas, se redujo a su vez su capacidad de retención de agua.

Los parámetros de van Genuchten de la Cuadro 9 expanden lo observado en las curvas, donde el valor de α es mayor para LP-M, seguido por AE. El parámetro α está asociado a la inversa del valor de entrada de aire en cmH₂O, entonces entre mayor sea este valor menor es la succión necesaria para drenar los poros (Benson et al., 2014). Por el contrario, los valores de n no varían mucho entre las arenas hidrofóbicas y la arena control. Esto significa que las pendientes de las curvas después del punto de entrada de aire son similares (Benson et al., 2014); en otras palabras, una vez que se comienzan a drenar los poros, se drenan a una tasa parecida.

Cuadro 9. Parámetros del modelo de retención de agua de van Genuchten y valores de K_{sat} .

Material	Modelo	θ_s	α	n	m	RMSE	K_{sat} (cm/h)	Clasificación K_{sat} (USDA, 2017)
Control	van Genuchten (1-1/n)	0,41	0,0199	5,544	0,820	0,00076	170,5	Muy alto (>30) cm/h
AE	van Genuchten (1-1/n)	0,37	0,0269	6,139	0,837	0,00176	3,4	Moderadamente alto (1,7-5,4) cm/h
LP-M	van Genuchten (1-1/n)	0,32	0,0758	4,543	0,780	0,00162	4,5	Moderadamente alto (1,7 -5,4) cm/h

A partir de los resultados, es evidente que existe una relación entre el ángulo de contacto y la retención de agua, especialmente al comparar los resultados de LP-M y AE. En LP-M se midieron ángulos de contacto superiores y, consecuentemente, una capacidad de retención de agua menor.

La capacidad de retención de agua reducida de las arenas hidrofóbicas se debe a que las fuerzas adhesivas entre la partícula y el agua son muy débiles, por lo que al aplicar una succión baja se drenan rápidamente los poros.

Este comportamiento también se puede explicar por medio del modelo de ascenso capilar. Dicho modelo asemeja los poros en el suelo con tubos capilares, lo cual permite comprender el movimiento ascendente o descendente del agua en los poros. Entre las variables del modelo se encuentra el ángulo de contacto entre la superficie de las partículas y el agua. Según la teoría, para suelos con un ángulo de contacto mayor a 90° , el agua sufre una capilaridad depresiva en lugar de un ascenso capilar (Hillel, 2004).

Lo descrito anteriormente, es uno de los componentes que permite que la barrera capilar hidrofóbica sea exitosa en detener la infiltración, ya que su fuerza capilar será mucho menor a la fuerza capilar de la capa de suelo superior.

En un estudio realizado por Liu et al. (2012), se obtuvo un resultado similar, y amplían discutiendo que, la hidrofobicidad de un suelo disminuye cuando se encuentra saturado, por lo que en la curva de retención solo se manifiesta el efecto de la hidrofobicidad a valores de succión más altos. En otras palabras, a pF cercanos a cero, dos arenas físicamente idénticas, pero con hidrofobicidad distinta, deberían tener un mismo comportamiento en su curva característica de retención de agua; y a pF más altos se experimentan diferencias en retención de agua.

Por otra parte, se ha reportado que suelos hidrofóbicos experimentan una reducción significativa de infiltración de agua (Nyman et al., 2010), un fenómeno que resulta óptimo para la cosecha de agua en el suelo. Los valores de K_{sat} , en la Cuadro 9, reflejan una reducción importante en la capacidad hidráulica de las arenas ya que hubo una reducción de aproximadamente 98% de K_{sat} en AE y LP-M en comparación con el control.

En la Figura 28b se observa la variación de la conductividad hidráulica al aplicar succión en LP-M, AE y la arena control. Al comparar la arena control con las arenas hidrofóbicas, se observa que para reducir su conductividad hace falta aplicar una succión mayor. Además, a cualquier succión, la arena siempre tendrá una conductividad mayor.

Por otro lado, si bien el K_{sat} de LP-M es mayor que el de AE, es evidente que a una succión menor la conductividad hidráulica de LP-M comienza a bajar mientras la de AE se mantiene constante. En otras palabras, a valores de succión mayores a 0,8 pF la conductividad hidráulica de LP-M es menor que AE. Adicionalmente, a un pF de 2 (-100 cmH₂O), las conductividades hidráulicas son iguales a cero.

Caracterización del suelo de Isla Caballo.

Se caracterizó el suelo de Isla Caballo para determinar la factibilidad del uso de la barrera capilar hidrofóbica para la cosecha de agua en esta zona. Se comenzó realizando una prueba de texturas con la cual se obtuvo la clasificación textural del suelo y se calculó la distribución de partículas; dichos resultados se encuentran en la Figura 29. La clase textural y la distribución de partículas están en la Figura 29a mientras que en la Figura 29b se ilustra la curva de frecuencia de partículas generada a partir de la derivada del modelo de Rosin-Rammler, la cual se ajustó a los puntos medidos con un R^2 de 0,998.

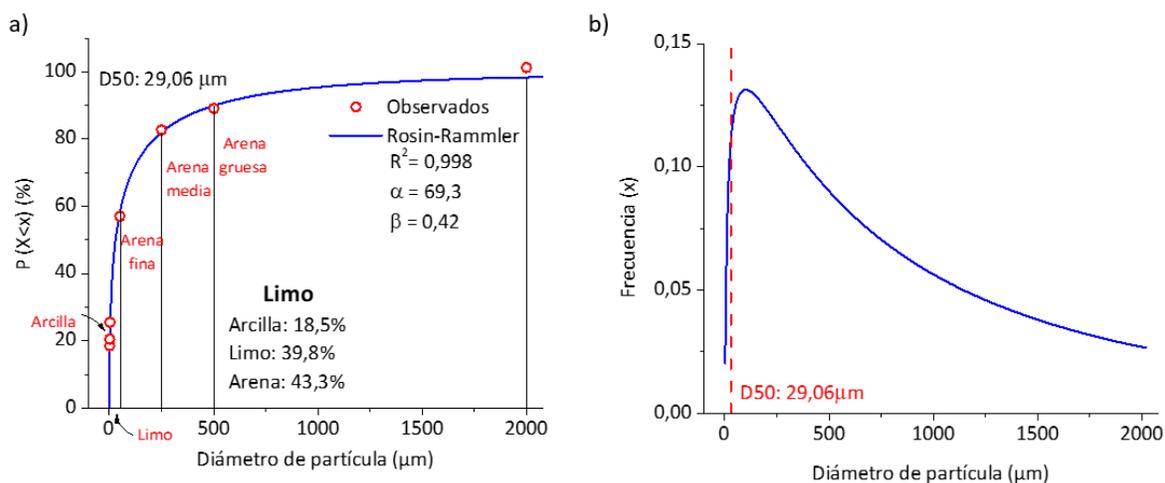


Figura 29. Caracterización del suelo de Isla Caballo

(a) Distribución de partículas y textura (b) Curva de frecuencia miau curva característica de retención de agua y curva de conductividad hidráulica insaturada

Según la clasificación de la USDA (1987), el suelo tiene una clase textural limosa, con altas fracciones de limo y arena, 39,8% y 43,3%, respectivamente. Como se ha mencionado anteriormente, para cosechar agua mediante barrera capilar, es importante que la capa de suelo sobre la barrera tenga una fuerza capilar superior a la arena hidrofóbica. La arcilla presente en el suelo tiene un rol importante en la existencia de fuerzas capilares, debido a que es la partícula con el menor diámetro. Debido a que la capilaridad es inversamente proporcional a el tamaño de poro (Hillel, 2004), entre más arcillas haya en un suelo, mayor será la fuerza capilar y por ende la retención de agua en la matriz. Consecuentemente, como las arenas hidrofóbicas no tienen arcillas, se puede asumir que su fuerza capilar será menor. No obstante, también es necesario que el suelo permita la infiltración del agua de lluvia para que esta llegue hasta la capa de arena hidrofóbica y sea posible cosecharla (Abu-Zreig et al., 2020). La predominancia de arenas y limos en el suelo permiten dicha infiltración (Abu-Zreig et al., 2020).

La Cuadro 10 presenta los valores de diámetros máximos de distintos porcentajes de partículas acumulados, el Cu y el Cc. Los valores obtenidos de Cu y Cc indican que el suelo tiene una buena gradación (Day, 2010). Asimismo, es claro que los diámetros D30 y D60 se alejan bastante del valor de D50, lo cual también es un buen indicador de que existe un gran rango de tamaño de partículas en el suelo. Por otro lado, en la Figura 29b se observa que el diámetro de partícula con mayor frecuencia se encuentra por debajo del D50. Y, es notorio que la curva de frecuencia es bastante baja, ya que ninguna frecuencia supera 0,14. Todo lo anterior es característico de un suelo con una amplia gama de tamaños de partícula.

Cuadro 10. Diámetros y coeficientes de la curva de distribución de partículas del suelo de Isla Caballo.

D10	D30	D50	D60	Cu	Cc
µm					
0,3	6,01	29,1	56,3	168,9	1,9

La Figura 30 muestra los parámetros hidráulicos del suelo de Isla Caballo: su curva característica de retención de agua con sus respectivos coeficientes; y la curva de variación de la conductividad en función de la succión.

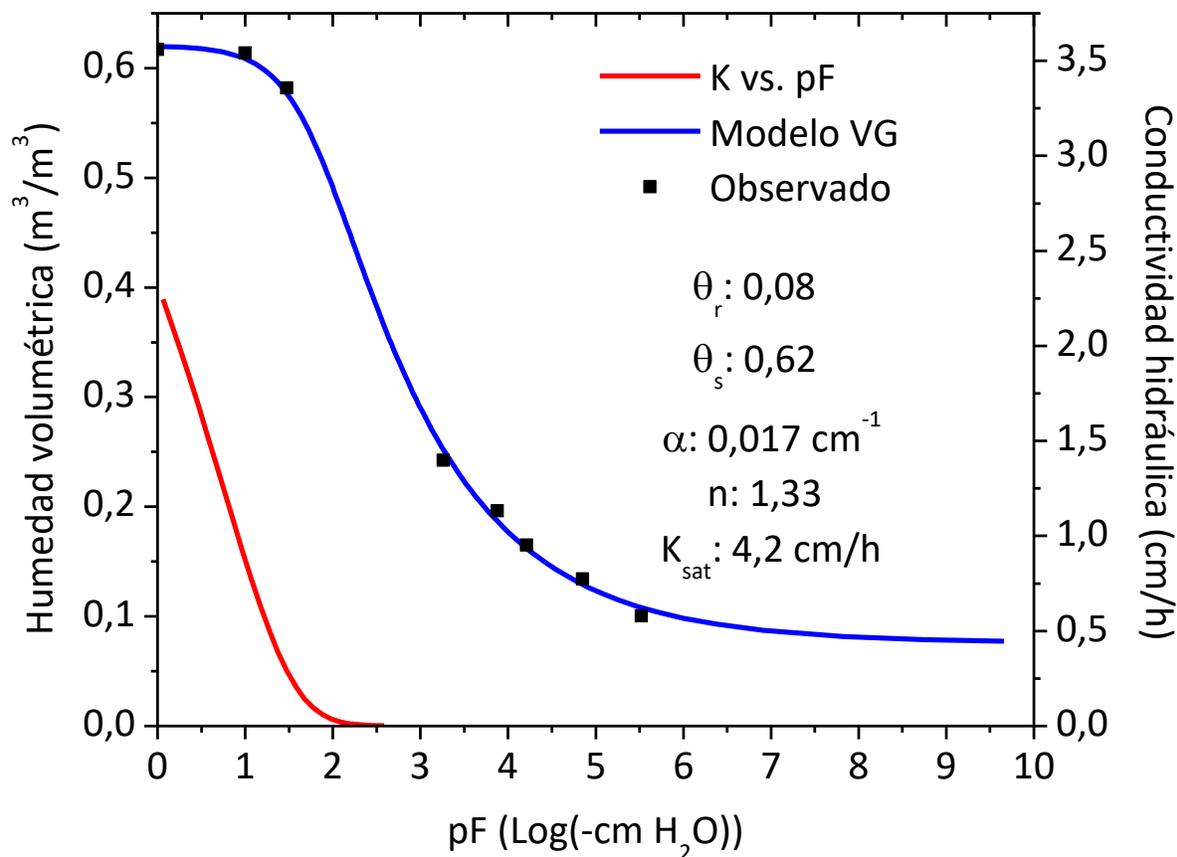


Figura 30. Curva característica de retención de agua y curva de conductividad insaturada para el suelo de Isla Caballo

La curva característica de retención de agua fue construida a partir de puntos obtenidos experimentalmente y el modelo de van Genuchten calculado mediante RETC (van Genuchten et al., 1991). El modelo se ajustó adecuadamente a los puntos observados con un R^2 de 0,999 sin embargo, a partir de 8 pF se vuelve asintótica, una característica común en curvas de van Genuchten (1980). Se confirma este error puesto que según Groenevelt y Bolt (1972), los suelos tienden a alcanzar un contenido de agua de $0 m^3/m^3$ a 6,9 pF.

Como era de esperar, la curva de retención y sus parámetros correspondientes indican que el suelo tiene una retención de agua mayor a las arenas hidrofóbicas. Se observa que su valor de entrada de aire, 1,77 pF, es mayor al observado en LP-M y AE. Asimismo, el parámetro n es significativamente menor a los de las arenas hidrofóbicas, por lo que el drenaje del agua en los poros sucede de forma más lenta. Si bien la retención del suelo es mayor, no es excesivo, lo

que indica que una cantidad importante de agua de lluvia será capaz de atravesar la matriz del suelo hasta la barrera capilar hidrofóbica.

El K_{sat} del suelo es de 4,2 cm/h, la cual es una conductividad hidráulica saturada moderadamente alta. La curva de conductividad hidráulica en función de la succión demuestra que, a aproximadamente pF 2,0 (-100 cmH₂O), la conductividad hidráulica se reduce a 0 cm/h. Dicha succión corresponde, según la curva característica de retención de agua, a un contenido de agua volumétrica de 0,58 m³/m³.

Datos meteorológicos de Isla Caballo.

La Figura 31 ilustra los datos meteorológicos mensuales de Isla Caballo de los últimos 5 años utilizando curvas de precipitación, evapotranspiración potencial y precipitación efectiva. Como se puede observar los valores de precipitación varían considerablemente entre los años. No obstante, es posible identificar una tendencia a dos períodos de picos de lluvias: uno en la primera mitad del año y el segundo en la segunda mitad del año. En la primera mitad del año, el pico suele suceder alrededor de mayo y junio; mientras que, en la segunda mitad del año, suele ser en los meses de setiembre y octubre. Por otro lado, el comportamiento de la curva de evapotranspiración potencial se mantiene constante a través de los años; con un pico en marzo.

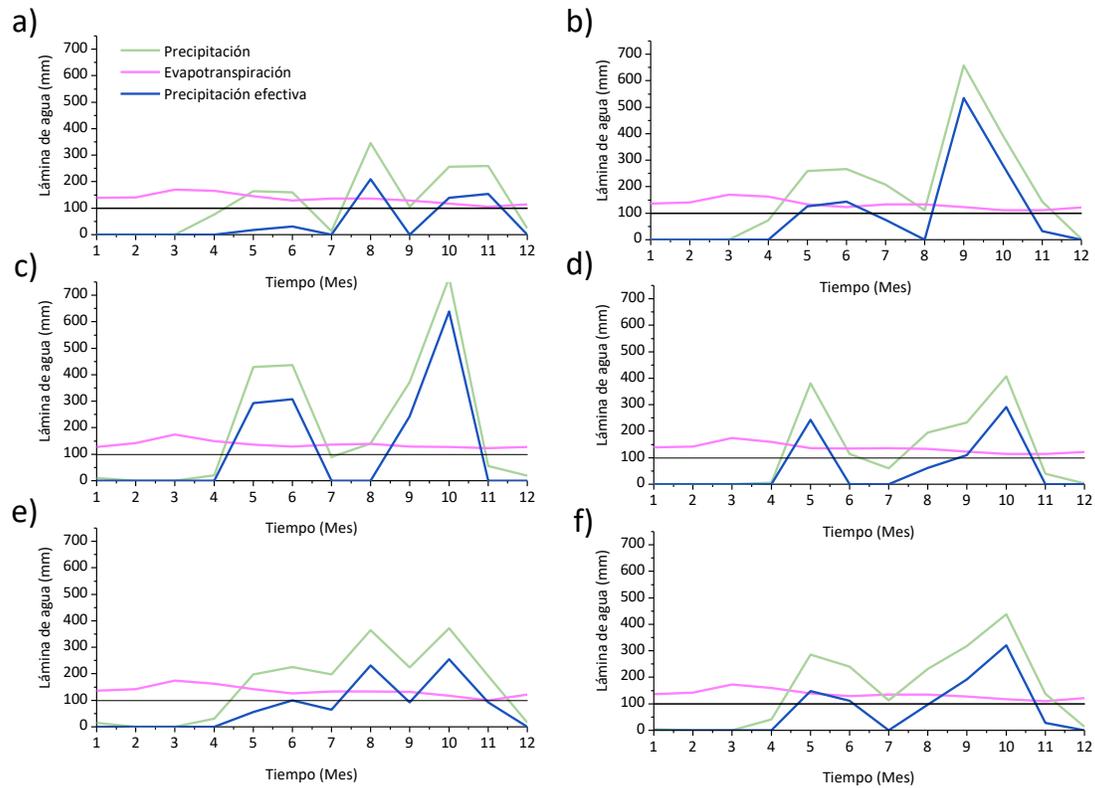


Figura 31. Precipitación y evapotranspiración potencial mensual en Isla Caballo
 (a) 2016; (b) 2017; (c) 2018; (d) 2019; (e) 2020; (f) promedio de cinco años

Para el primer pico de lluvia, en el transcurso de los 5 años se experimentaron precipitaciones efectivas totales entre 49,1mm y 600,6 mm. En el segundo pico se registraron precipitaciones efectivas totales entre 138,6 mm y 881 mm. Ambos valores inferiores pertenecen al 2016, mientras que los valores superiores se alcanzaron en el 2018.

Para efectos de la investigación, se calculó un promedio mensual utilizando los datos de los 5 años. Si bien la desviación estándar de los promedios es elevada, se observa que los picos de precipitación suceden en los mismos meses. Con el fin de determinar la cantidad de agua cosechable durante el año, se utilizaron los datos meteorológicos de aquellos meses con una precipitación efectiva promedio mayor a 100 mm: mayo, junio, setiembre y octubre.

Infiltración acumulada en épocas de cosecha en la Isla Caballo.

A continuación, en la Figura 32 se muestran las curvas de agua infiltrada acumulada en función del tiempo para distintas épocas de cosecha y simulando dos profundidades de suelo, 20 cm y

50 cm. Las profundidades corresponden a aquellas en las cuales se podría aplicar la barrera capilar hidrofóbica. Asimismo, la infiltración graficada corresponde a la cantidad de agua que atraviesa la matriz del suelo hasta alcanzar la barrera. Hydrus 1D (Simunek et al., 2018) utiliza los parámetros hidráulicos del suelo y meteorológicos de la zona para simular cuánta agua se obtendría al nivel de la capa y por ende calcular cuánta agua es cosechable.

Los valores totales en la Figura 32 corresponden al agua infiltrada total, equivalente a la cantidad de agua cosechable en cada periodo simulado. A 20 cm de profundidad, en un año se obtiene un total de 745 L/m²: 255 L/m² en mayo y junio; y 490 L/m² en setiembre y octubre. Mientras que, a 50 cm de profundidad, en un año se obtiene un total de 677 L/m²: 233 L/m² en mayo y junio; y 444 L/m² en setiembre y octubre. Según los resultados obtenidos, la cosecha en setiembre y octubre es cerca del doble de la obtenida en mayo y junio. Además, en mayo y junio se obtendría una mayor cantidad de agua infiltrada a 50 cm mientras que en setiembre y octubre se cosecharía más agua con una capa a una profundidad de 20 cm.

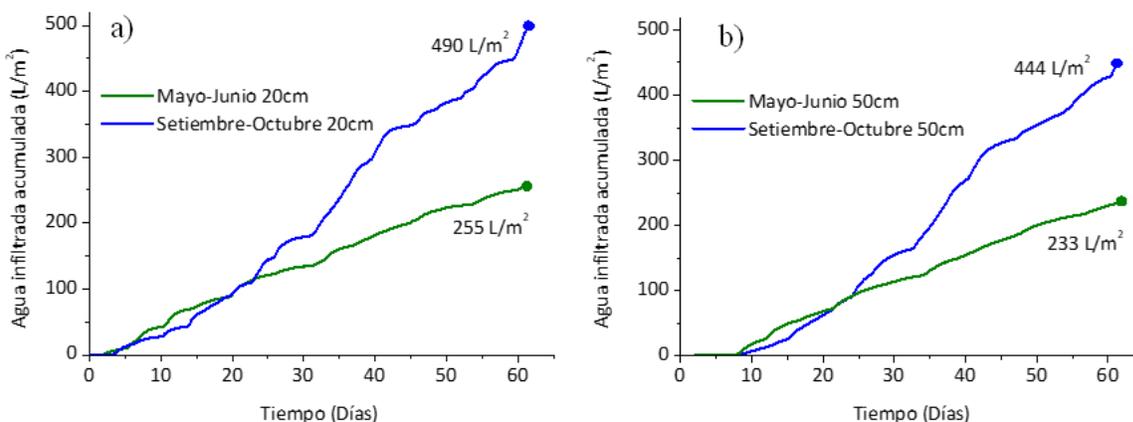


Figura 32. Infiltración acumulada de agua modelada con Hydrus 1D para dos épocas de cosecha.

(a) 20 cm y (b) 50 cm

5.3. Generalidades

En síntesis, las arenas hidrofóbicas elaboradas a partir de borosilicato molido y grasa extraída de lodo de aceite de palma son válidos para la construcción de barreras capilares hidrofóbicas en el suelo de Isla Caballo. Primeramente, se comprobó la viabilidad del uso de residuos sólidos para la fabricación de arenas hidrofóbicas. Por medio la molienda de vidrio borosilicato

se pueden producir arenas entre los diámetros de 106 μm y 210 μm , y de tamaño uniforme, lo cual permite un recubrimiento homogéneo de la arena. Según las imágenes SEM, se observó que las arenas tienen una geometría angular. Por otro lado, la extracción sólido-líquido de grasa del lodo residual de la producción de aceite de palma fue exitosa, y presentó un rendimiento de 45 $\text{g}_{\text{grasa}}/\text{kg}_{\text{lodo}}$.

Posteriormente, tras realizar tres recubrimientos abarcando 6 concentraciones distintas; por medio de mediciones de ángulo de contacto, se evidenció que hubo un aumento drástico en la hidrofobicidad de las arenas con valores cercanos a 120° para LP-M y LP-D; y de $107,48^\circ$ para AE. Según los resultados obtenidos, LP-M presentó el mayor grado de hidrofobicidad, seguido por LP-D y, finalmente, AE. En ambos, LP-M y LP-D, se alcanzó un ángulo de contacto máximo a 1 g/kg , de $118,8^\circ$ y $119,7^\circ$, respectivamente. En las siguientes concentraciones de 1,3 g/kg y 1,6 g/kg se redujeron los ángulos de contacto iniciales a $113,8^\circ$ y $114,5^\circ$, respectivamente, para LP-M; y para LP-D se redujeron a $114,1^\circ$ y $115,5^\circ$ para 1,3 g/kg y 1,6 g/kg , respectivamente. Se considera que, en el caso de LP, aumentar la concentración produce grumos que impiden la formación uniforme de monocapas y ocasionan menor hidrofobicidad. Por el contrario, AE alcanzó un ángulo de contacto máximo de $107,4^\circ$ a 1,6 g/kg , pero los valores obtenidos muestran un ángulo de contacto de 100° a 0,3 g/kg , valor que se mantuvo constante hasta una concentración de 1,3 g/kg , donde subió a $103,6^\circ$. Por lo tanto, se determinó que recubrimientos de vidrio borosilicato molido con GLAP mediante mezclado es óptimo. A pesar de obtener resultados positivos de ángulo de contacto, las imágenes SEM mostraron que no hubo formación de una monocapa en las arenas, en especial para AE.

En las pruebas de compactación se concluyó que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre el grado de compactación máximo y mínimo, contrario a lo que se esperaba, según la ley de Cassie-Baxter. Se considera que no hubo un cambio en el ángulo de contacto porque los grados de compactación no produjeron cambios importantes en la fracción de aire del suelo. En cuanto a el efecto de la temperatura tampoco se obtuvo una diferencia estadísticamente significativa, no obstante, fue posible observar una leve disminución de 3° en el ángulo de contacto al secar las arenas a 105°C .

Seguidamente, se evaluaron las propiedades hidráulicas de las arenas y el suelo de Isla Caballo para determinar la viabilidad de aplicar barreras capilares hidrofóbicas a partir de LP-M. En

cuanto a las CCRA de las arenas, como se esperaba, se obtuvo la misma tendencia que para los ángulos de contacto, donde LP-M presentó una menor retención de agua, seguido por AE y finalmente, la arena control. La relación entre la hidrofobicidad y la retención de agua se explicó mediante el fenómeno de capilaridad. Por otra parte, la K_{sat} de las arenas hidrofóbicas fueron aproximadamente 98% menores al K_{sat} de la arena control, confirmando el efecto de la hidrofobicidad en la impermeabilidad de LP-M y AE. Contrario a lo esperado, AE obtuvo un K_{sat} mayor a LP-M, sin embargo, en las curvas de conductividad hidráulica en función del pF se observó que a ciertas succiones LP-M tiene menor conductividad hidráulica. Lo anterior confirma que arenas hidrofóbicas fabricadas a partir de GLAP y vidrio borosilicato podrían servir para prevenir la percolación del agua al subsuelo y por ende significar una tecnología aplicable para barreras capilares hidrofóbicas.

El suelo de la Isla Caballo tiene una textura limosa y una amplia gama de diámetro de partículas. Su curva de retención de agua mostró que tiene una retención superior a las de las arenas hidrofóbicas, es decir, existe una diferencia significativa entre las fuerzas capilares del suelo y las arenas hidrofóbicas. Por lo tanto, se concluye que el suelo de la Isla Caballo y las arenas hidrofóbicas son aptas para la construcción de barreras capilares hidrofóbicas.

Finalmente, a partir de los datos meteorológicos se aislaron dos épocas con precipitación efectiva promedio mayor a 100 mm/mes: mayo a junio y setiembre a octubre. Se realizó un balance considerando las propiedades hidráulicas del suelo y las condiciones meteorológicas para determinar la cantidad de agua que se podría interceptar mediante la barrera capilar hidrofóbica.

Los valores obtenidos muestran que si se utilizara en un relleno sanitario podría evitar la producción de aproximadamente 711 L/m² de lixiviados que requieren tratamiento posteriormente. En el caso de una aplicación superficial, para la desviación y almacenamiento de agua, se podrían cosechar 711 L/m², los cuales podrían ser utilizados en riego, baños o, con un tratamiento adecuado ser viables para consumo humano. Se podrían combinar las aplicaciones donde se evita la infiltración de agua de lluvia en rellenos sanitarios y se desvía dicha agua para su uso en actividades humanas. Para la agricultura son 711 L/m² de agua de riego ahorrados y, dependiendo del cultivo que se desee, la tabla de agua se podría poner más cerca o lejos de la superficie del suelo.

Si bien los resultados indican que el recubrimiento de arenas con ácidos grasos, a partir de residuos sólidos de vidrio borosilicato y lodo residual de la producción de aceite de palma, fue exitoso y que estas son aplicables en el suelo para formar una barrera capilar hidrofóbica, esta investigación tiene sus limitaciones. Primeramente, no se lograron recubrimientos con forma de monocapa sobre la superficie de las arenas, por lo que se considera que se debe optimizar la metodología de recubrimiento; además de modificar la molienda de vidrio para obtener partículas más esféricas y por ende más fáciles de recubrir. Seguidamente, se desconoce la composición química de la grasa extraída y su biodegradabilidad en el suelo de Isla Caballo; análisis esenciales en la determinación de la viabilidad del uso de las arenas. Asimismo, falta corroborar la efectividad de la barrera capilar hidrofóbica en interceptar agua de manera experimental. Finalmente, aún se desconoce el costo de escalamiento de la tecnología por lo que no se puede confirmar su factibilidad.

6. CONCLUSIONES

Fue posible extraer 45 g de grasa por cada kg de lodo residual utilizando un solvente orgánico. El 96% de la grasa total extraída se obtuvo en la segunda extracción por lo que se concluye que solo dos extracciones son necesarias.

Se determinó que la metodología de molienda de vidrio y tamizaje fue exitosa en fabricar arenas entre diámetros de 106 μm y 200 μm . Se fabricaron partículas uniformes, lo que asegura una heterogeneidad en el recubrimiento de ácidos grasos y un drenaje simultáneo de los poros de su matriz.

Las mediciones de ángulo de contacto mostraron que los recubrimientos de ácido esteárico y GLAP aumentaron drásticamente la hidrofobicidad de las arenas. Las arenas LP-D y LP-M obtuvieron ángulos de contacto máximos de 118,83° y 119,73°, respectivamente, mientras que para AE fue de 107,48°. También se observó que LP-M tiene una hidrofobicidad mayor a LP-D por lo que la metodología óptima de recubrimiento de GLAP es por mezclado.

Para ambas LP-M secada a 105 °C y secada al aire, se observó que, a grados de compactación de 1,2 g/cm³ y 1,3 g/cm³ LP-M, no hubo un cambio estadísticamente significativo en el ángulo de contacto inicial. Mas, sí hubo un cambio leve en el ángulo de contacto en el tiempo entre los dos grados de compactación para LP-M secadas a 105 °C por 24 h.

Calentar LP-M a 105 °C no generó una diferencia estadísticamente significativa en el ángulo de contacto, no obstante, se observó que se redujo su ángulo de contacto levemente en comparación con LP-M seca al aire.

Los cambios en los parámetros hidráulicos de las arenas hidrofóbicas confirman su efectividad para interceptar agua percolada de lluvia en el suelo, debido a que se disminuyó su fuerza capilar y la conductividad hidráulica disminuyó en aproximadamente 98%.

El suelo de Isla Caballo tiene una textura limosa y su curva característica de retención de agua indica que tiene una buena capacidad de infiltración y retiene considerablemente más agua que las arenas hidrofóbicas.

Al aplicar la barrera capilar hidrofóbica en el suelo de Isla Caballo, se podrían cosechar 467 ± 23 L/m² en el periodo de setiembre a octubre; y 244 ± 11 L/m² de mayo a junio.

En resumen, las arenas hidrofóbicas elaboradas a partir de residuos sólidos encontrados dentro del mercado costarricense son aptas para la construcción de barreras capilares hidrofóbicas en el suelo de Isla Caballo y puede ser escalado a otras zonas con déficit hídrico. Las aplicaciones de arenas hidrofóbicas varían desde construcción de calles, purificación de agua residual, instalaciones eléctricas hasta barreras capilares hidrofóbicas. Además, en el caso de Isla Caballo, esta tecnología podría presentar una solución alternativa para el abastecimiento de agua de uso agrícola, doméstico y para la prevención de la contaminación del agua subterránea.

7. RECOMENDACIONES

Optimizar los recubrimientos de las arenas para obtener una monocapa en las partículas de arena y, afinar el proceso de molienda para obtener partículas de arena más esféricas, que permitan una mejor adhesión del agente hidrofóbico.

Repetir pruebas utilizando otros vidrios cuya gestión es limitada y generación es abundante, como el vidrio plano.

Analizar la composición química del GLAP para determinar cuáles son los ácidos grasos que lo componen para conocer más sobre sus propiedades físicas y químicas.

Realizar una prueba piloto de laboratorio con suelo de Isla Caballo y LP-M a 1 g/kg, para comprobar datos de recolección de agua interceptada.

Gestionar la planificación del uso del suelo, según las necesidades inmediatas de la población meta para valorar la viabilidad de implementar barreras capilares hidrofóbicas.

Determinar la posibilidad de aplicar las arenas hidrofóbicas en obras civiles, como en taludes de rellenos sanitarios o vías de transporte.

Realizar un estudio económico sobre el escalamiento de la tecnología, para determinar la viabilidad económica de realizar un proyecto con las arenas fabricadas.

Examinar la biodegradabilidad de las arenas hidrofóbicas debido a la acción de los microorganismos del suelo de Isla Caballo.

8. REFERENCIAS

- Abu-Zreig, M., Fujimaki, H., & Elbasit, M. A. A. (2020). Enhancing water infiltration through heavy soils with sand-ditch technique. *Water (Switzerland)*, *12*(1312), 1–15. <https://doi.org/10.3390/W12051312>
- Alam, M. R., Zain, M. F. M., Kaish, A. B. M. A., & Jamil, M. (2015). Underground soil and thermal conductivity materials based heat reduction for energy-efficient building in tropical environment. *Indoor and Built Environment*, *24*(2), 185–200. <https://doi.org/10.1177/1420326X13507591>
- Alim, M. A., Rahman, A., Tao, Z., Samali, B., Khan, M. M., & Shirin, S. (2020). Feasibility analysis of a small-scale rainwater harvesting system for drinking water production at Werrington, New South Wales, Australia. *Journal of Cleaner Production*, *270*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122437>
- Artizar, G., & Carillo, C. (2016). Pozos que hablan. La experiencia de gestión comunitaria del agua en Isla Caballo, vinculada al Programa de Desarrollo Integral de Comunidades Rurales Costeras del Golfo de Nicoya, Costa Rica. *Agua, Cultura y Territorio.*, 258–273. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6341562>
- Bachmann, J., & McHale, G. (2009). Superhydrophobic surfaces: A model approach to predict contact angle and surface energy of soil particles. *European Journal of Soil Science*, *60*(3), 420–430. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01118.x>
- Bautista-Olivas, A. L., Tovar-Salinas, J. L., Palacios-Velez, O. L., & Mancilla-Villa, O. R. (2011). La humedad atmosférica como fuente opcional de agua para uso doméstico. *Agrociencia*, *45*(3), 293–301.
- Beckett, C., Fourie, A., & Toll, D. (2016). Water repellent soils: The case for unsaturated soil mechanics. *EDP Sciences*, *9*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160911011>
- Benson, C. H., Chiang, I., Chalermyanont, T., & Sawangsuriya, A. (2014). Estimating van Genuchten Parameters α and n for Clean Sands from Particle Size Distribution Data. In *From Soil Behaviour Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering* (Vol. 1, Issue 1, pp. 410–427). Geotechnical Special Publication.

<https://doi.org/10.1061/9780784413265.033>

- Boglaienko, D., & Tansel, B. (2016). Encapsulation of light hydrophobic liquids with fine quartz sand: Property based characterization and stability in aqueous media with different salinities. *Chemical Engineering Science*, *145*, 90–96.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.02.010>
- Cassie, B., & Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*, *40*, 546–551.
- Cervera-Mata, A., Aranda, V., Ontiveros-Ortega, A., Comino, F., Martín-García, J. M., Velasco-Cano, M., & Delgado, G. (2021). Hydrophobicity and surface free energy to assess spent coffee grounds as soil amendment. Relationships with soil quality. *Catena*, *196*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104826>
- Chan, C. S. H., & Lourenço, S. D. N. (2016). Comparison of three silane compounds to impart water repellency in an industrial sand. *Geotechnique Letters*, *6*(4), 1–4.
<https://doi.org/10.1680/jgele.16.00097>
- Cháves, C. (2019, August). Isla Caballo: Filtran agua de lluvia para abastecer de agua potable a EBAIS. *CAMPUS*.
http://www.campus.una.ac.cr/ediciones/2019/agosto/2019agosto_pag16b.html
- Choi, Y., Choo, H., Yun, T. S., Lee, C., & Lee, W. (2016). Engineering characteristics of chemically treated water-repellent Kaolin. *Materials*, *9*(978).
<https://doi.org/10.3390/ma9120978>
- CRHoy. (2015, October 1). AyA tiene un año para llevar agua potable a Isla Caballo. *CRHoy*. <https://archivo.crhoy.com/aya-tiene-un-ano-para-llevar-agua-potable-a-isla-caballo/nacionales/>
- Dane, J., & Hopmans, J. (2002). Water Retention and Storage. In Jacob Dane & C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis* (p. 677). Soil Science Society of America.
- Day, R. W. (2010). 4. Soil Mechanics. In *Foundation Engineering Handbook: Design and Construction with the 2009 International Building Code* (Segunda ed). The McGraw-Hill Companies.

- DeBano, L. (1981). *Water repellent soils: a state-of-the-art*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01806-1_18
- DIME. (2008). *Hydrophobic sand by DIME*. India Waterportal. <https://www.indiawaterportal.org/articles/hydrophobic-sand-dime>
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & Walsh, R. P. D. (2000). Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth Science Reviews*, 51, 33–65. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8)
- Eijkelkamp Soil & Water. (2019). *User Manual: Sandbox for pF-determination* (pp. 1–25).
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucuman. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Gee, G., & Or, D. (2002). Particle Size Analysis. In Jacob Dane & C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis* (Vol. 3, Issue 2, pp. 225–282). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0722>
- George W., M. (1936). The Composition of Glass. *American Association for the Advancement of Science*, 42(6), 542–554. <https://doi.org/10.1177/002205741508100313>
- Goebel, M. , Bachmann, J., Reichstein, M., Janssens, I. A., & Guggenberger, G. (2011). Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition- is there a link to extreme climatic events? *Glob. Change Biol.*, 17, 2640–2656.
- González-Peñaloza, F. A., Zavala, L. M., Jordán, A., Bellinfante, N., Bárcenas-Moreno, G., Mataix-Solera, J., Granged, A. J. P., Granja-Martins, F. M., & Neto-Paixão, H. M. (2013). Water repellency as conditioned by particle size and drying in hydrophobized sand. *Geoderma*, 209, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.022>
- Gordon, G., Stavi, I., Shavit, U., & Rosenzweig, R. (2018). Oil spill effects on soil hydrophobicity and related properties in a hyper-arid region. *Geoderma*, 312(October 2017), 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.008>
- Groenevelt, P., & Bolt, G. (1972). Water retention in Soil. *Soil Science*, 113(4), 238–245.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to Environmental Soil Physics* (1st ed.). Elsevier Science.

- Iley, W. J. (1991). Effect of particle size and porosity on particle film coatings. *Powder Technology*, 65, 441–445. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(91\)80205-W](https://doi.org/10.1016/0032-5910(91)80205-W)
- Imteaz, M. A., Ali, M. Y., & Arulrajah, A. (2012). Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material. *Waste Management and Research*, 30(9), 917–921. <https://doi.org/10.1177/0734242X12448512>
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/446727a>
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In *Cambridge University Press*.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf
- Israelachvili, J. N. (2011). Adhesion and Wetting Phenomena. In *Intermolecular and Surface Forces* (3rd ed., pp. 415–467). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-391927-4.10017-9>
- Jones, J. V., & Ohlberg, S. M. (1991). Flat Glass Composition with Improved Melting and Tempering Properties (Patent No. 5071796). In *United States Patent* (No. 5071796).
- Khire, M. V., Benson, C. H., & Bosscher, P. J. (2000). Capillary Barriers: Design Variables and Water Balance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(8), 695–708. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2000\)126:8\(695\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:8(695))
- Koncagül, E., Tran, M., & Connor, R. (2021). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2021: el valor del agua, datos y cifras*. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_spa
- Lai, O.-M., Tan, C.-P., & Akoh, C. (1995). *Palm Oil: Production, Processing, Characterization and Uses*. AOCS Press.
- Lai, O., Phuah, E., Lee, Y., & Basiron, Y. (2020). Palm Oil. In *Bailey's Industrial Oil and Fat Products* (pp. 1–101). <https://doi.org/10.1002/047167849x.bio071.pub2>

- Liu, H., Ju, Z., Bachmann, J., Horton, R., & Ren, U. (2012). Moisture-Dependent Wettability of Artificial Hydrophobic Soils and Its Relevance for Soil Water Desorption Curves. *Soil Science Society of America Journal*, 76(2), 342–349.
<https://doi.org/10.2136/sssaj11.0081>
- Liu, J., Zhu, X., Zhang, H., Wu, F., Wei, B., & Chang, Q. (2018). Superhydrophobic coating on quartz sand filter media for oily wastewater filtration. *Colloids and Surfaces A*, 553, 509–514. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.06.007>
- Liu, Y., & Choi, C.-H. (2021). Superhydrophobic Sand for the Preservation and Purification of Water. *Coatings*, 11(151).
- Lowe, M. A., McGrath, G., & Leopold, M. (2021). The Impact of Soil Water Repellency and Slope upon Runoff and Erosion. *Soil and Tillage Research*, 205.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104756>
- Mao, J., Zhang, K., & Chen, B. (2019). Linking hydrophobicity of biochar to the water repellency and water holding capacity of biochar-amended soil. *Environmental Pollution*, 253, 779–789. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.051>
- Meerdink, J., Benson, C., & Khire, M. (1996). Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122, 565–576.
- Meter Group Inc. (2017). *WP4C Operator's Manual*.
- Meyers, L., & Frasier, G. (1969). Creating hydrophobic soil for water harvesting. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 95(6436), 43–54.
<https://ascelibrary.org/journal/jidedh>
- Morris, J. B., Tisi, D. A., Tan, D. C. T., & Worthington, J. H. (2019). Development and palatability assessment of norvir® (Ritonavir) 100 mg powder for pediatric population. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(1718), 1–11.
<https://doi.org/10.3390/ijms20071718>
- Núñez, J. (2019, November 12). Repensar Isla Caballo. *UNA Comunica*.
<https://www.unacomunica.una.ac.cr/index.php/noviembre-2019/2779-repensar-isla-caballo>

- Nyman, P., Sheridan, G., & Lane, P. N. J. (2010). Synergistic effects of water repellency and macropore flow on the hydraulic conductivity of a burned forest soil, south-east Australia. *Hydrological Processes*, 24(20), 2871–2887.
<https://doi.org/10.1002/hyp.7701>
- Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO). (2013). Captación Y Almacenamiento De Agua De Lluvia. In *Santiago de Chile*. FAO.
<http://www.fao.org/3/i3247s/i3247s.pdf>
- Quesada, G. (2010, October 20). Proyecto Turístico en Isla Caballo. *UNED*.
https://www.uned.ac.cr/acontecer/index.php?option=com_content&view=article&id=573:proyecto-turistico-en-la-isla-caballo&catid=56:articulos&Itemid=79
- Reynolds, W. D., Elrick, D. E., Youngs, E. G., Booltink, H. W. G., & Bouma, J. (2002). Physical Methods. In Jacob Dane & C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis* (pp. 802–816). Soil Science Society of America.
- Ruíz, A., & Rimolo, R. (2021). *Desarrollo de un sistema sostenible de cosecha de agua atmosférica para uso comunitario y en sistemas productivos en Costa Rica*.
- Saenz, A. (2009). *Waterproof Nanotech Sand Could Change Deserts into Farms*. Singularity Hub. <https://singularityhub.com/2009/09/17/waterproof-nanotech-sand-could-change-deserts-into-farms/>
- Simunek, J., Sejna, M., & van Genuchten, R. (2018). *Hydrus 1D* (4.17). PC-Progress.
- Sivakugan, N. (2021). Soil Classification. In *Soil Mechanics and Foundation Engineering: Fundamentals and Applications*. McGraw Hill. <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.itcr.ac.cr/content/book/9781260468489>
- Solanki, B., Gopak, Y., & Tadikonda, B. V. (2016). *Capillary Barrier Effects in Unsaturated Layered Soils*. July, 1–8.
- Solano, J. (2019, August 10). *La NASA registra 75% menos de lluvia en zonas de Costa Rica*. <https://www.crhoy.com/tecnologia/la-nasa-registra-75-menos-de-lluvia-en-zonas-de-costa-rica/>

- Stokes, G. G. (1819). On the effect of internal friction of fluids on the motion of pendulums. In *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* (pp. 8–106). Cambridge University Press.
- Subedi, S., Hamamoto, S., Komatsu, T., & Kawamoto, K. (2013). Development of hydrophobic capillary barriers for landfill covers system: Assessment of water repellency and hydraulic properties of water repellent soils. *Res. Rep. Dep. Civ. Environ. Eng., Saitama Univ*, 39, 33–44.
- Subedi, S., Kawamoto, K., Jayarathna, L., Vithanage, M., Moldrup, P., Wollesen de Jonge, L., & Komatsu, T. (2012). Characterizing Time-Dependent Contact Angles for Sands Hydrophobized with Oleic and Stearic Acids. *Vadose Zone Journal*, 11(1). <https://doi.org/10.2136/vzj2011.0055>
- Sun, Y., Liu, Y., Xu, B., Chen, J., Yuan, W., Jiang, C., Wang, D., & Wang, H. (2021). Simultaneously achieving high-effective oil-water separation and filter media regeneration by facile and highly hydrophobic sand coating. *Science of the Total Environment*, 800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149488>
- Tagle-Zamora, D., Azamar-Alonso, A., & Caldera-Ortega, A. (2018). Cosecha de agua de lluvia como alternativa para la resiliencia hídrica en León , Guanajuato: una reflexión desde la nueva cultura del agua. *Expresión Económica*, 40, 5–24.
- Tagle Zamora, D., Azamar Alonso, A., & Caldera Ortega, A. (2018). Cosecha de agua de lluvia como alternativa para la resiliencia hídrica en León , Guanajuato: una reflexión desde la nueva cultura del agua. *Expresión Económica*, 40, 5–23.
- U.S. Department of Agriculture., & Natural Resources Conservation Service. (2017). *National Soil Survey Handbook*. http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054242
- U.S. Department of Agriculture. (1987). USDA Textural Soil Classification Guide. In *Soil Mechanics Level I* (pp. 1–53). https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044818.pdf
- van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic

- Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- van Genuchten, M. T., Simunek, J., Leij, F. J., & Sejna, M. (1991). *RET.C*. PC-Progress. <https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?retc>
- Vesilind, A. (1980). The rosin-rammler particle size distribution. *Resource Recovery and Conservation*, 5(3), 275–277. [https://doi.org/10.1016/0304-3967\(80\)90007-4](https://doi.org/10.1016/0304-3967(80)90007-4)
- Wartman, J., Grubb, D. G., & Nasim, A. S. M. (2004). Select Engineering Characteristics of Crushed Glass. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(6), 526–539. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2004\)16:6\(526\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2004)16:6(526))
- Wijewardana, N. S., Kawamoto, K., Moldrup, P., Komatsu, T., Kurukulasuriya, L. C., & Priyankara, N. H. (2015). Characterization of water repellency for hydrophobized grains with different geometries and sizes. *Environmental Earth Sciences*, 74(7). <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4565-6>
- Woche, S., Bachmann, J., Horton, R., & Ploeg, vander R. R. (2000). Modified Sessile Drop Method for Assessing Initial Soil-Water Contact Angle of Sandy Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 564–567.
- Wu, H., Yao, C., Li, C., Miao, M., Zhong, Y., Lu, Y., & Liu, T. (2020). Review of Application and Innovation of Geotextiles in Geotechnical Engineering. *Materials*, 13(1774), 1–21. <https://doi.org/10.3390/MA13071774>
- Young, T. (1805). An essay on the cohesion of fluids. *Royal Society*, 95, 65–87.
- Yue, C., Liu, J., Zhang, H., Dai, L., Wei, B., & Chang, Q. (2018). Increasing the hydrophobicity of filter medium particles for oily water treatment using coupling agents. *Heliyon*, 4(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00809>
- Zhan, L., Li, G., Jiao, W., Lan, J., Chen, Y., & Shi, W. (2020). Performance of a compacted loess/gravel cover as a capillary barrier and landfill gas emissions controller in Northwest China. *Science of the Total Environment*, 718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137195>

- Zheng, S., Lourenco, S., Cleall, P., Chui, T. F. M., Ng, A., & Millis, S. (2017). Hydrological behaviour of model slopes with synthetic water repellent soils. *Journal of Hydrology*, 554, 582–599. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.013>
- Zheng, S., Xing, X., Lourenço, S. D. N., & Cleall, P. J. (2021). Cover systems with synthetic water-repellent soils. *Vadose Zone Journal*, 20(1), 1–15. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20093>
- Zhou, Z., Leung, A. K., Karimzadeh, A. A., Lau, C. H., & Li, K. W. (2021). Infiltration through an Artificially Hydrophobized Silica Sand barrier. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(6). <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0002543>
- Zyga, L. (2009). *Hydrophobic Sand Could Combat Desert Water Shortages*. Physics Org. <https://phys.org/news/2009-02-hydrophobic-sand-combat-shortages.html>

9. APÉNDICES

Apéndice 1: Datos meteorológicos

Cuadro A.1.1. Valores aleatorios de precipitación y evapotranspiración para mayo a junio.

N°	Fecha	Precipitación	Evapotranspiración
1	01-may	16.4127246	0.956891012
2	02-may	9.723625	9.314583982
3	03-may	9.10985849	6.53661249
4	04-may	0.44390811	3.181985007
5	05-may	13.6529431	0.072870411
6	06-may	12.6633887	2.232992555
7	07-may	13.523987	3.073262645
8	08-may	7.37749117	8.200807749
9	09-may	1.4483127	0.703683411
10	10-may	12.2299328	2.037799229
11	11-may	16.5986424	0.266439627
12	12-may	7.22910833	6.799332792
13	13-may	1.7890202	1.379144496
14	14-may	14.283158	4.817014484
15	15-may	12.049813	8.021562739
16	16-may	6.8067341	3.926678228
17	17-may	6.29534942	7.259967501
18	18-may	4.00817573	8.092519478
19	19-may	13.666381	1.869259752
20	20-may	14.021946	0.338646571
21	21-may	14.2061967	8.524392249
22	22-may	13.0917985	7.959355233
23	23-may	6.78225215	5.06422109
24	24-may	2.31629632	8.009395684
25	25-may	14.5821168	4.966716809
26	26-may	3.49746527	0.996242845
27	27-may	5.70427624	5.059101343

28	28-may	5.56585114	6.456883767
29	29-may	4.88019733	3.642669498
30	30-may	6.53830151	3.288873264
31	31-may	15.6207481	5.830094057
32	01-jun	5.02960138	1.760675837
33	02-jun	13.2631741	0.27197555
34	03-jun	8.52471116	5.951815438
35	04-jun	3.65990877	1.664121004
36	05-jun	8.09987529	4.085463545
37	06-jun	11.6971338	3.935064716
38	07-jun	5.80570254	3.890362604
39	08-jun	9.51905017	1.579354284
40	09-jun	7.57233821	4.969472254
41	10-jun	12.7415215	8.870002544
42	11-jun	11.1967195	5.994054
43	12-jun	2.51353935	7.799999385
44	13-jun	15.6252182	5.559899939
45	14-jun	5.58405791	1.323315796
46	15-jun	10.8736701	2.927903773
47	16-jun	3.06560449	2.032660106
48	17-jun	6.96637739	2.823269879
49	18-jun	7.97968978	8.581292182
50	19-jun	3.07406807	2.760399374
51	20-jun	4.11585102	5.389081088
52	21-jun	3.67194761	1.777890893
53	22-jun	15.2260297	2.970918942
54	23-jun	8.25913742	4.520754648
55	24-jun	11.9950812	7.698181486
56	25-jun	9.05950967	5.864951359
57	26-jun	4.56973418	9.83280138
58	27-jun	3.00023855	0.545877634
59	28-jun	13.0203418	4.443327623
60	29-jun	5.52266516	3.38683725

61	30-jun	9.16750193	5.188275487
----	--------	------------	-------------

Cuadro A.1.2. Valores aleatorios de precipitación y evapotranspiración para setiembre a octubre.

N°	Fecha	Precipitación	Evapotranspiración
1	01-sep	4.48499288	3.073543883
2	02-sep	2.74200072	3.385556213
3	03-sep	26.0106068	6.155351041
4	04-sep	5.64239168	0.099642816
5	05-sep	7.4011116	5.716408518
6	06-sep	13.6876841	6.850246808
7	07-sep	5.02649547	8.019397766
8	08-sep	1.35627596	1.782396352
9	09-sep	7.85707007	7.271911341
10	10-sep	25.5941653	7.301111903
11	11-sep	2.6614144	6.455740326
12	12-sep	6.99487145	2.529241417
13	13-sep	0.69858828	0.814872077
14	14-sep	24.8025131	1.239837688
15	15-sep	8.98895257	4.901432979
16	16-sep	16.7468264	8.492398507
17	17-sep	6.23539067	1.409079027
18	18-sep	10.5435625	2.692928007
19	19-sep	4.61556316	2.056697125
20	20-sep	17.6517511	2.568816624
21	21-sep	6.25258775	5.799214674
22	22-sep	4.90636163	0.9317048
23	23-sep	23.4154109	4.492338971
24	24-sep	25.0601123	7.451480918
25	25-sep	2.8965007	3.663119134

26	26-sep	22.1929675	0.449325729
27	27-sep	15.9111776	9.07986215
28	28-sep	0.91076774	4.74146836
29	29-sep	10.355045	5.696337029
30	30-sep	6.79684055	2.078537815
31	01-oct	9.97338226	0.555974081
32	02-oct	25.9292326	7.513690301
33	03-oct	16.4625123	3.489433443
34	04-oct	13.1254263	0.201972712
35	05-oct	19.4686638	2.411136812
36	06-oct	16.6198878	0.879706127
37	07-oct	27.9840423	7.907071931
38	08-oct	6.46947844	0.55159176
39	09-oct	15.2362049	6.497706826
40	10-oct	25.1028489	3.934630461
41	11-oct	21.9987883	3.433488246
42	12-oct	3.02308809	3.679803794
43	13-oct	1.97953602	2.643428599
44	14-oct	11.8850962	4.036837704
45	15-oct	5.85072401	2.353928441
46	16-oct	23.4221277	6.1654981
47	17-oct	0.36523272	4.844841225
48	18-oct	19.5565345	7.05627305
49	19-oct	6.60386554	1.9653806
50	20-oct	5.30169076	3.026297807
51	21-oct	5.13288608	5.95657082
52	22-oct	25.3444854	6.806816197
53	23-oct	1.46151255	7.721393935
54	24-oct	25.9619648	1.960048976
55	25-oct	8.84166359	3.121947009

56	26-oct	13.724579	0.470160006
57	27-oct	2.88924672	8.656405169
58	28-oct	12.389027	6.037686397
59	29-oct	10.2054533	1.651727114
60	30-oct	26.8988383	1.334050439
61	31-oct	29.1119797	0.934501919
