



INVESTIGACIÓN

<https://doi.org/10.22463/issn.0122-820X>

Evaluación de hidrogeles de lodos resultantes del lavado de arena y piedra como alternativa para el tratamiento de suelos áridos.

Michel Juliatt Arango-Tolosa,^a Pedronel Araque-Marín,^b Carlos Alberto Peláez-Jaramillo^c

^aIngeniera Biotecnológica, Investigadora de la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

^bMagister en Ciencias Químicas, Coordinador Grupo de Investigación e Innovación en Formulaciones Químicas de la Universidad EIA, Envigado, Colombia.

^cDoctor en Ciencias Químicas, Coordinador del Grupo Interdisciplinario GIEM de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Recibido el 23 de Julio de 2017; Aprobado el 02 de Diciembre de 2017.

PALABRAS CLAVE

Fitotoxicidad, Hidrogeles, Lodos, Suelos áridos

Evaluación de hidrogeles de lodos resultantes del lavado de arena y piedra como alternativa para el tratamiento de suelos áridos

En la fase de elaboración de materiales para la construcción, se genera una gran cantidad de residuos como el lodo generado en los procesos de lavado de los materiales agregados, originados de rocas, arena y gravas que no pueden ser reutilizados o aprovechados en los demás procesos de producción. En tal sentido, se busca crear alternativas de manejo y disposición de estos residuos. Para ello se requiere evaluar la fitotoxicidad de hidrogeles formulados a partir de lodos procedentes de las aguas resultantes del lavado de arena y piedra como alternativa para el tratamiento de suelos áridos y se evaluó la fitotoxicidad en los modelos biológicos *Raphanus sativus* y *Brachiaria dictyoneura*. De tal manera, para el estudio, se caracterizaron fisicoquímica, microbiológica y microscópicamente los lodos de lavado de arena y piedra. Los lodos fueron formulados tipo hidrogel para valorar la capacidad de retención y recuperación de agua, cinética de evaporación y fitotoxicidad. Los análisis realizados determinaron que el lodo de arena es un buen candidato para el tratamiento de suelos áridos, ya que este es óptimo para la germinación, promueve el crecimiento y desarrollo de las plantas como *R. sativus* y *B. dictyoneura*.

KEYWORDS

phytotoxicity, hydrogels, Sludge, arid soils

Evaluation of mud hydrogels resulting from the washing of sand and stone as an alternative for the treatment of arid soils

In building materials manufacturing a large amount of wastes which cannot be used in the other production processes are generated. Among the residues there is the sludge, it is generated during the process of washing the materials aggregates originating from rocks, sands and gravels, depending on the finished product. Besides it is necessary to create alternatives for the management and disposal of these wastes. For this reason, this work aims to evaluate the effect of hydrogels formulated from sludge as an alternative for the treatment of arid soils. The sludge was studied by physicochemical, microbiological and microscopically characterization and the phytotoxicity was evaluated in the biological models *Raphanus sativus* and *Brachiaria dictyoneura*. The hydrogel type sludge was formulated to evaluate the capacity of retention and recovery of water. Besides, kinetics of evaporation and phytotoxicity was evaluated. The analyzes carried out determined that the sand sludge is a good candidate for the treatment of arid soils since it is optimal for the germination, the growth and development of the plants like *R. sativus* and *B. dictyoneura*.

PALABRAS - CHAVE

Fitotoxicidade, Hidrogéis, Lodos, Solos Áridos

Avaliação de hidrogéis de lamas resultantes da lavagem de areia e pedra como alternativa para o tratamento de solos áridos.

Na etapa de processamento de materiais de construção, uma grande quantidade de resíduos, tais como lamas geradas nos processos de lavagem de materiais agregados, provenientes de rochas, areia e cascalho que não podem ser reutilizados ou utilizados em outros processos é gerado de produção. Nesse sentido, busca criar alternativas de gerenciamento e descarte desses resíduos. Isto requer a avaliar a fitotoxicidade de hidrogeles feitos a partir de lamas de depuração de água de lavagem resultante a partir de areia e pedra como uma alternativa para o tratamento de solo seco e fitotoxicidade em modelos biológicos e *Raphanus sativus* *Brachiaria dictyoneura* avaliadas. Desta forma, para o estudo, os lodos de lavagem com areia e pedra foram caracterizados físico-química, microbiológica e microscopicamente. O lodo foi formulado em hidrogel para avaliar a capacidade de retenção e recuperação de água, a cinética de evaporação e a fitotoxicidade. As análises determinou que a areia das lamas é um bom candidato para o tratamento de solos secos, uma vez que este é óptimo para a germinação, promove o crescimento e desenvolvimento de plantas, tais como *R. sativus* e *B. dictyoneura*.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: pedronel.araque@eia.edu.co (Pedronel Araque-Marín).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander, Este es un artículo bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

La desertificación se define como la “reducción o destrucción del potencial biológico de la tierra que puede llevar a la creación de condiciones análogas a las de un desierto natural”, el cambio de la composición de la vegetación y de la fauna acompañado por la baja productividad biológica, el empeoramiento del régimen de aguas [1] y el desarrollo de procesos destructores de la erosión eólica puede remover físicamente la parte más fértil del suelo, contaminar el aire, llenar las cunetas de las carreteras, reducir la supervivencia, el crecimiento de las plántulas, reducir la comercialización de los cultivos hortícolas y, en su más extremo, crear nuevas formas y paisajes desérticos en un proceso conocido comúnmente como desertificación [2].

La erosión eólica y la desertificación han seguido aumentando a medida que más tierras áridas y semiáridas se vuelven vulnerables a la erosión debido al cambio climático, el crecimiento demográfico, la urbanización, el cultivo de tierras marginales y el sobrepastoreo [3]. Es por esto que la aridez corresponde a una falta de disponibilidad de agua para los seres vivos y se relaciona con factores meteorológicos o climáticos. Así mismo, puede caracterizar un área específica y tiene un carácter relativamente permanente, igualmente, por valores de precipitación se pueden definir como zonas áridas aquella en las cuales la precipitación es menor a 250 mm/año, y como zonas semiáridas aquellas en las cuales la precipitación varía entre 250 y 500 mm/año [1].

Los áridos naturales se obtienen extrayendo arena y piedra, los cuales se trituran, se lavan y se clasifican [4]. El lavado y la clasificación de los agregados naturales producen lechada de lodo residual. El agua sucia obtenida del proceso recibe la disolución del floculante, esto obliga al lodo a decantar rápidamente hacia el fondo. Este residuo inerte, generalmente se depura en vertederos. Dadas las grandes cantidades de residuos producidos junto con su transporte y la disminución del espacio de vertederos, la eliminación del lodo residual se está convirtiendo en un problema para la sociedad [5].

La contaminación ambiental provocada por la generación de estos residuos, ha motivado a buscar soluciones a las actuales problemáticas y ha ayudado a generar nuevas alternativas sostenibles, una de estas, es remediar los suelos degradados aplicando residuos de lodo como acondicionadores del suelo para el establecimiento de una rizosfera productiva y para lograr una cobertura vegetal extensa y saludable [6]. En relación con el proceso de remediación, los hidrogeles pueden absorber grandes cantidades de agua y retenerla durante periodos específicos [7].

Recientemente ha suscitado un mayor interés, el uso de hidrogeles en el campo de la agricultura debido a sus enormes ventajas como bajo costo, biodegradabilidad, resistencia específica aceptable, baja densidad, buenas propiedades térmicas, reciclabilidad, ningún riesgo para la salud, generosidad y energía mejorada [8].

Estudios sobre el uso de hidrogeles se han reportado desde hace 70 años donde se muestran la viabilidad para mejorar la capacidad de absorción de agua en el suelo, especialmente el agua de lluvia, reducir de la lixiviación de nutrientes y mejorar la aireación y drenaje del suelo; además favorecer el desarrollo del sistema y crecimiento de las plantas como mejorar la actividad biológica e incrementar la producción [9]–[12]. Sus efectos más importantes son en suelos con drenaje alto [13] de textura arenosa [10], al igual que en climas áridos [11], [14], [15].

El poliacrilato de sodio polímero formado por monómeros $-(CH_2CHCO_2Na)-$, como se representa en la (figura 1a y 1b), es conocido como supeabsorbente por la capacidad que tiene de retener altas cantidades de agua. En estado sólido, es un polvo blanco y las cadenas poliméricas se encuentran agregadas sin estructura definida (figura 1c), pero en contacto con el agua, las cadenas poliméricas se alinean para interactuar con las moléculas de agua generando una estructura reticular llamada hidrogel (figura 1c).

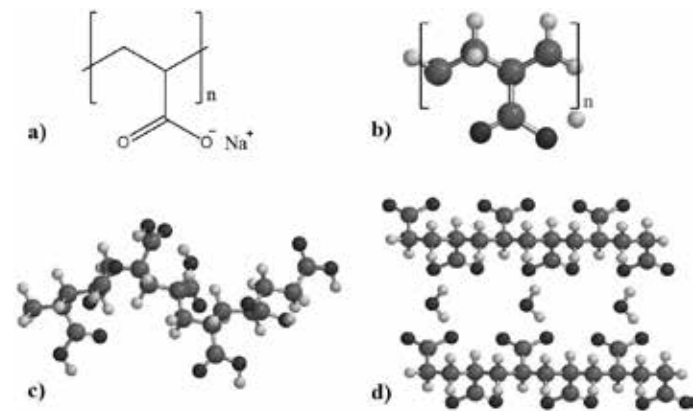


Figura 1. Representación molecular del polímero poliacrilato de sodio: a) representación bidimensional del monómero; b) representación tridimensional del monómero; c) representación tridimensional de poliacrilato en estado sólido; d) representación tridimensional de gel de poliacrilato.

Fuente: Autores

Formulaciones tipo hidrogel, reportan mejoras en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos [16], aumentar el contenido de materia orgánica, agregar nutrientes esenciales que promueven el crecimiento y el enraizamiento de las plantas, disminución de la biodisponibilidad de metales [17], [18] mejora la capacidad de retención de humedad [19], la fertilidad del suelo [20], el aumento de la capacidad de retención de agua mejoran la aireación y mantienen temperaturas que fomentan el desarrollo de plantas como *Beta vulgaris* (Acelga) [21], *Glycine max* (soya) [22], *Zea mays* (maíz) [23], *Apium graveolens* (apio) [24], *Lycopersicon esculentum* (tomate) [25] y plantas forestales [26].

Teniendo en cuenta las problemáticas mencionadas, la generación de lodos de arena y piedra en industrias de construcción y la desertificación de los suelos debido al cambio climático, promueve la necesidad de encontrar soluciones y generar un estudio en el cual se buscan vías de tratamiento. Por esta razón, en el presente trabajo se caracterizaron química y biológicamente hidrogeles formulados a partir de lodos procedentes de las aguas de lavado de arena y piedra, como alternativa para el tratamiento de suelos áridos.

Materiales y métodos

La metodología para la evaluación de hidrogeles de lodos resultantes del lavado de arena y piedra como alternativa para el tratamiento de suelos áridos se detalla en el diagrama 1.

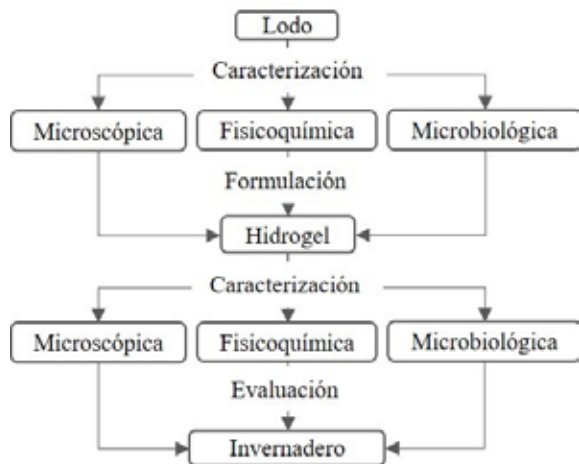


Diagrama 1. Representación esquemática de la metodología utilizada.
Fuente: Autores

Reactivos El nitrato de plata $AgNO_3(s)$ ($\geq 99\%$) y el hidróxido de sodio $NaOH(s)$ ($\geq 99\%$), fueron provenientes de Aldrich Chemical Co. Ltd., Proanalysis. El poliacrilato de sodio Mw $\sim 5,100$ (92%), el Agar Papa Dextrosa (PDA, Oxoid), el Agar Nutritivo (Agar Scharlau Microbiology 01-140-500), Agar Bisuto Bisulfito y el Agar Violeta cristal-Rojo neutro-Bilis-Glucosa (VRBD) fue adquirido de Sigma Chemical Co. (St. Louis, MO).

Material de siembra Los lodos procedentes de las aguas resultantes del lavado de arena y piedra fueron suministrados por la empresa CECOLTEC S.A.S y el Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares-GIEM de la Universidad de Antioquia. A demás el suelo tipo Andisol (Fulvuland) fue proporcionado por el Grupo de Investigación e Innovación en Formulaciones Químicas de la Universidad EIA.

Las semillas de *Raphanus sativus* y *Brachiaria dictyoneura* (Serie Gold) fueron adquiridas en la casa comercial AGROSEMILLAS S.A, con pureza del 96 % y germinación 85 %, los cuales se almacenaron en oscuridad, con humedad relativa del 30 % y temperatura de 4 °C, para inhibir su germinación y mantener su viabilidad.

Preparación lodo control 100g de suelo Andisol fue suspendido en un litro de agua destilada con agitación continua por 10 minutos, posteriormente se dejó en percolación por 6 horas y finalmente se separó por decantación, el líquido depurado fue utilizado como lodo control.

Preparación de los hidrogeles La preparación de los hidrogeles se realizó partiendo de capacidad de hinchamiento del hidrogel con los diferentes lodos (expresado como la capacidad de retención de lodo). Para un gramo de poliacrilato de sodio los volúmenes de lodo control, lodo de arena y lodo de piedra fueron: 97 mL, 48 mL y 33 mL respectivamente.

Preparación de los medios de cultivo Los medios de cultivo fueron preparados independientemente con las siguientes cantidades de cada Agar: PDA (36g/L); Agar Nutritivo (28g/L), Agar Bisuto Bisulfito (52g/L) y el Agar VRBD(41,5g/L). Los diferentes tipos de Agar fueron suspendidos en un litro de agua destilada. Se calentaron bajo agitación constante durante un minuto hasta disolver completamente, para la esterilización los medios se llevaron a la autoclave a 121 ° C, con 15 lbs de presión, durante 20 minutos.

Análisis microbiológico de los lodos Los lodos fueron analizados cualitativa y cuantitativamente para determinar la presencia de microorganismos meso aerobios, termófilos, anaerobio, salmonella, mohos, levaduras y enterobacterias. Se realizaron diluciones seriadas a partir de una solución patrón que se preparó mezclando 10 mL de lodo con 90 mL de agua destilada, de esta solución se tomó un 1 mL en 9 mL de agua peptona estéril sucesivamente hasta 10^{-7} . Se sembraron en los respectivos medios de cultivo 100 μ L de las concentraciones 1×10^{-1} , 1×10^{-5} y 1×10^{-7} . Se incubaron las cajas a 37° C por 24 horas para Aerobios, mesófilos, anaerobios, Salmonella, mohos, levaduras y enterobacterias. Para bacterias termófilas se incubó a 57°C por 24 horas. Para los microorganismos meso aerobios, termófilos y anaerobios se utilizó el Agar Nutritivo, para Salmonella el Agar Bismuto Sulfito, para mohos y levaduras el Agar PDA y finalmente para enterobacterias se usó Agar VRBD

Análisis físicoquímico Los análisis físicoquímicos se realizaron bajo los parámetros de la Norma Técnica Colombiana (NTC 370; NTC 234; NTC 5167), Soil Survey Laboratory Methods Manual Reporte N°42, Versión 2.0, 1992 (SSLMM-42-2-92, Standard Methods (SM3111B; SM3112A; SM3114C), American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), International Standard ISO 13320 y Water Pollution Control Federation (WPCF) y como se ilustran en la tabla I.

Tabla I. PARAMETROS PARA ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

Parámetro	Expresado como	Técnica	Norma
Nitrógeno	N. total	Kjeldahl	NTC 370
Carbono	C. Orgánico	Volumetría	NTC 5167
Relación C/N	No aplica	No aplica	No aplica
Fósforo	P ₂ O ₅	Spectrofotometría	NTC 234
Potasio	K ₂ O	Absorción Atómica	SM 3111B
Sodio	Na	Absorción Atómica	SM 3111B
Calcio	CaO	Absorción Atómica	SM 3111B
Magnesio	MgO	Absorción Atómica	SM 3111B
Cinc	Zn	Absorción Atómica	SM 3111B
Cromo	Cr	Absorción Atómica	SM 3111B
Cadmio	Cd	Absorción Atómica	SM 3111B
Plomo	Pb	Absorción Atómica	SM 3111B
Niquel	Ni	Absorción Atómica	SM 3111B

Evaluación de hidrogeles de lodos resultantes del lavado de arena y piedra como alternativa para el tratamiento de suelos áridos

Arsénico	As	A:A Generador de Hidruros	SM 3114C
Mercurio	Hg	A:A: Vapor frío	SM 3112A
Densidad (20°C)	No aplica	Gravimetría	NTC 5167
pH	No aplica	Potenciometría	SSLMM-42-2-92
Conductividad eléctrica	No aplica	Potenciometría	NTC 5167
Sólidos suspendidos	No aplica	Gravimetría	APHA-AWWA WPCF 2540D
Tamaño de partícula	No aplica	Difracción de luz laser	ISO 13320

Fuente: Autores

Análisis microscópico

La caracterización microscopía se realizó utilizando un Microscopio Electrónico Phenom SEM. Ampliación óptica: 20-135x. Ampliación SEM 80-130000x y tamaño de partícula se determinó mediante la técnica de dispersión de luz láser, usando un Mastersizer Malvern 3000.

Análisis fitotóxico de los lodos las semillas fueron colocadas sobre filtros de papel 595 Rundfilter 110 mm, impregnados con 5mL de lodo en cajas de Petri (90x15mm) estériles, a las cuales se les agregó 20 semillas de *R. sativus* y de *B. dictyoneura*. Para *R. sativus* se midió la germinación a las 24 horas. Elongación de radícula a las 48 horas y elongación de hipocótilo a las 72 horas, mientras que para *B. dictyoneura* se midió germinación a las 48 horas, elongación de la raíz y hoja principal a las 72 horas. Las pruebas se hicieron por triplicado.

Montaje de prueba en invernadero Una vez el suelo Andisol se encontraba entre el 50% y el 60% de la máxima capacidad de retención de humedad se procedió a sembrar 2,3168 g de semillas de *B. dictyoneura* (182 semillas /200g de tratamiento) en materas de dimensiones 11,9 cm x11,9 cm x 12 cm. Las semillas fueron sembradas bajo luz natural en la Universidad de Antioquia, municipio de Medellín (Departamento de Antioquia, 6°15'06" N; 75°33'48" O, 1500 m de altitud). Es importante aclarar que no se adicionó agua a ninguno de los tratamientos durante 15 días. Las semillas se distribuyeron en un arreglo completamente al azar al momento de la siembra, el diseño experimental fue completamente aleatorio y cada tratamiento se repitió tres veces.

Análisis estadístico Los resultados fueron comparados estadísticamente utilizando análisis de varianza de una vía (ANOVA), seguida por el test de comparación múltiple para las diferencias entre las medias, usando STATGRAPHICS Centurion XVI. II.

Resultados y discusiones

Caracterización Físicoquímica Basados en la norma técnica colombiana NTC 5167 la cual indica que los abonos o fertilizantes orgánico-minerales los líquidos deben cumplir con los requisitos que se muestran en la (tabla II), aunque los lodos de arena y piedra no cumplen con algunos parámetros para ser utilizados como fertilizantes debajo del límite requerido.

Tabla I. PARAMETROS PARA ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

Parámetro	Expresado como	Lodo Control	Lodo Arena	Lodo Piedra	Unidades	NTC 5167
Nitrógeno	N. total	0,20 ± 0,01	0,031 ± 0,002	1,60 ± 0,01	g/L	≥ 15 g/L
Carbono	C. Orgánico	0,60 ± 0,01	0,082 ± 0,003	0,046 ± 0,002	g/L	> 50 g/L
Relación C/N	No aplica	3,00	2,6	0,29	No aplica	No aplica
Fósforo	P ₂ O ₅	0,12 ± 0,02	No detectado	No detectado	g/L	≥ 15 g/L
Potasio	K ₂ O	2,16 ± 0,03	0,109 ± 0,004	0,062 ± 0,004	g/L	≥ 15 g/L
Sodio	Na	0,10 ± 0,03	0,341 ± 0,001	0,706 ± 0,001	g/L	≤ 10g/L
Calcio	CaO	1,59 ± 0,8	1,068 ± 0,004	261,8 ± 0,004	g/L	≥ 10 g/L
Magnesio	MgO	0,98 ± 0,2	1,930 ± 0,008	1,1814 ± 0,001	g/L	≥ 10 g/L
Cinc	Zn	0,0010 ± 0,0001	0,0066 ± 0,0003	0,0076 ± 0,0003	g/L	Reportar
Cromo	Cr	No detectado	18,70 ± 0,03	35,50 ± 0,04	ppm	≤ 1200 ppm
Cadmio	Cd	No detectado	No detectado	1,93 ± 0,02	ppm	≤ 39 ppm
Plomo	Pb	No detectado	No detectado	16,78 ± 0,09	ppm	≤ 300 ppm
Niquel	Ni	No detectado	7,53 ± 0,06	6,50 ± 0,01	ppm	≤ 420 ppm
Arsénico	As	No detectado	No detectado	No detectado	ppm	≤ 41 ppm
Mercurio	Hg	No detectado	No detectado	No detectado	ppm	≤ 17 ppm
Densidad (20°C)	No aplica	6,85 ± 0,02	7,36 ± 0,01	7,32 ± 0,01	No aplica	≤ 8,5 ppm
pH	No aplica	1,01 ± 0,01	1,05 ± 0,05	0,97 ± 0,04	g/mL	Reportar
Conductividad eléctrica	No aplica	6,31 ± 0,2	0,21± 0,01	0,14± 0,01	dS/m	Reportar
Sólidos suspendidos	No aplica	0,8	123,7	168,8	g/L	≤ 40 g/L
Tamaño de partícula	No aplica	0,4-150	1,5-200	0,3-100	µm	Reportar

Fuente: Autores

Es importante resaltar que el pH de los lodos está dentro del rango óptimo para el crecimiento de los modelos biológicos 5,5-7,0 [27] y cumple los parámetros reportados para metales pesados que son trascendentales en los procesos de germinación especialmente en *Brachiararia dictyoneura* [28], la cual es utilizada como base de la alimentación en las sabanas orientales y en procesos de pastoreo continuo de bovinos en la altillanura colombiana además es una planta muy estudiada en la agricultura como forraje [14].

En la (figura 2) se muestran los resultados de distribución de tamaño de partícula para los lodos de arena y piedras. El lodo de arena presentó una distribución de tamaño de partícula polidispersa entre 1,5µm y 200µm posiblemente por agregados entre partículas en todo este rango, mientras que para el lodo de piedra se encontró un comportamiento bimodal polidisperso, con diámetros promedios de partícula $d_{32}(1) = 0,6 \mu\text{m}$; $d_{32}(2) = 4 \mu\text{m}$; $d_{32}(3) = 20 \mu\text{m}$ y $d_{32}(4) = 50 \mu\text{m}$, teniendo mejor resolución para $d_{32}(1)$ y $d_{32}(2)$ en el rango entre 0,3 µm y 100 µm, lo cual indica mayor estabilidad para procesos de sedimentación. Por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM) se corrobora la polidispersidad y diferencias morfológicas de los agregados de los lodos como se ilustra en la Figura 3.

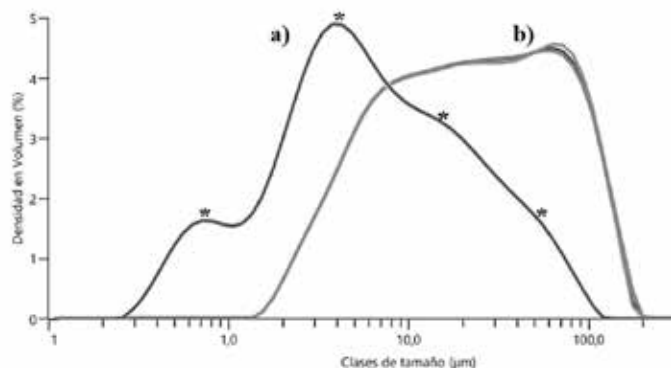


Figura2. Distribución de tamaño de partícula: a) lodo piedra; b) lodo arena. Fuente: Autores

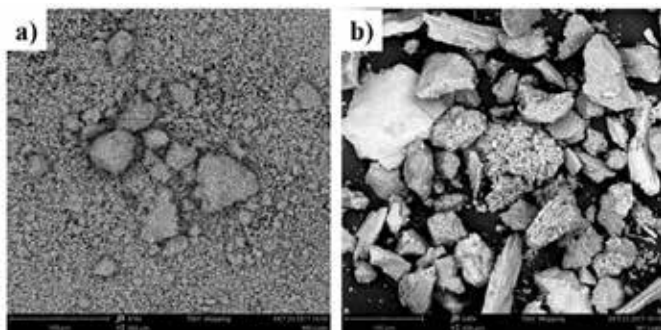


Figura 3. Microscopía electrónica de barrido (SEM) de lodos: a) partículas sólidas en los lodos de piedra a 810x; b) partículas sólidas en los lodos de arena a 640x. Fuente: Autores

Caracterización microbiológica En la (tabla III) se presenta la caracterización microbiológica de los lodos; la presencia de estos microorganismos se debe fundamentalmente al proceso no estéril realizado a campo abierto; sin embargo, es importante resaltar la presencia de microorganismo aerobios mesófilos, los cuales favorecen la descomposición de materia orgánica, fijación del nitrógeno, mineralización y la capacidad de intercambio catiónico [15].

Microorganismos	Lodo control	Lodo arena	Lodo piedra	Norma NTC 5167
Aerobios mesófilos	2x10 ² UFC	5,4x10 ⁷ UFC	8,5x10 ⁷ UFC	NTC 370
Termófilas	0	2x10 ⁶ UFC	3x10 ⁶ UFC	NTC 5167
Enterobacterias	0	<10 ² UFC	2x10 ² UFC	No aplica
Anaerobios	0	1x10 ⁶ UFC	1,2x10 ⁸ UFC	NTC 234
Mohos y Levaduras	0	1x10 ⁵ Mohos	6x10 ⁴ Levaduras	SM 3111B
Salmonella spp	Ausencia	Ausencia	Ausencia	SM 3111B
Coliformes totales	Ausencia	Ausencia	Ausencia	SM 3111B
Huevos de helmintos	Ausencia	Ausencia	Ausencia	SM 3111B
Fitopatógenos	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia

La presencia de hongos y levaduras tienen un efecto estimulante activo sobre el crecimiento y desarrollo de plantas mejorando su productividad, la solubilidad del fosfato, la producción de sideróforo y la estimulación en la colonización de la raíz micorrizal. Además, hay reportes sobre el efecto de las levaduras en la reducción de hongos fitopatógenos [16], [17]. La ausencia de Salmonella, Coliformes totales, Huevos de helmintos y fitopatógenos en los lodos nos indica que se cumple la Norma Técnica Colombiana 5167/04 [18] para productos acondicionadores de suelo.

Evaluación de la actividad fitotóxica de los lodos En la (tabla IV) se observa el efecto fitotóxico de los lodos sobre los modelos biológicos. Los lodos de arena no presentaron efecto fitotóxico sobre *R. sativus* y *B. dictyoneura*, dado que el porcentaje de germinación fue superior al 85%. La elongación de la radícula y raíz principal no tuvieron diferencia significativa ($p\text{-valor} < 0,005$) comparado con el control y el hipocótilo estimulo su crecimiento. Los lodos de piedra generaron fitotoxicidad en los dos modelos biológicos. Sobre *R. sativus* y *B. dictyoneura* se presentaron porcentajes de germinación inferiores al 80 % y 10% respectivamente, esta disminución se atribuye al porcentaje de sólidos insolubles (168,8 g/L) al tamaño de partícula ($d_{32}(1) = 0,6 \mu\text{m}$) y al recubrimiento generado por estas partículas a la superficie de las semillas.

Tabla IV. Actividad fitotóxica de los lodos sobre *R. sativus* y *B. dictyoneura*

<i>Raphanus sativus</i>			
	Germinación (%)	Radícula (cm)	Hipocótilo (cm)
Lodo control	97 ± 3	4,2 ± 0,3	2,0 ± 0,3
Lodo arena	85 ± 5	3,7 ± 0,2	2,7 ± 0,2
Lodo piedra	77 ± 3	3,2 ± 0,1	2,2 ± 0,1
<i>Brachiararia dictyoneura</i>			
	Germinación (%)	Radícula (cm)	Hipocótilo (cm)
Lodo control	98 ± 3	1,5 ± 0,1	1,8 ± 0,3
Lodo arena	87 ± 2	1,9 ± 0,2	2,8 ± 0,1
Lodo piedra	10 ± 1	0	0

Fuente: Autor

Evaluación de la actividad fitotóxica de los hidrogeles En la (tabla V) se observa el efecto fitotóxico de los hidrogeles de los lodos, sobre los modelos biológicos. En tal sentido, los lodos de arena no presentaron efecto fitotóxico sobre *R. sativus* y *B. dictyoneura*, dado que el porcentaje de germinación fue superior al 85%.

El hipocótilo y la hoja principal no presentaron diferencia significativa (p -valor $< 0,005$) comparado con el control y en la raíz principal de *B. dictyoneura* se observa estímulo de crecimiento. Los lodos de piedra generaron fitotoxicidad en los dos modelos biológicos. Sobre *R. sativus* y *B. dictyoneura* se presentaron porcentajes de germinación inferiores al 60 % y 0% respectivamente, esta disminución se atribuye al lodo de piedra.

Tabla V. Actividad fitotóxica de los hidrogeles sobre *R. sativus* y *B. dictyoneura*

<i>Raphanus sativus</i>			
	Germinación (%)	Radícula (cm)	Hipocótilo (cm)
Hidrogel Control	97 ± 3	0,4 ± 0,1	1,2 ± 0,3
Hidrogel Arena	90 ± 2	0,5 ± 0,1	1,1 ± 0,5
Hidrogel Piedra	55 ± 5	0,9 ± 0,2	1,1 ± 0,4

<i>Brachiaria dictyoneura</i>			
	Germinación (%)	Radícula (cm)	Hipocótilo (cm)
Hidrogel Control	98 ± 3	1,2 ± 0,5	2,9 ± 0,2
Hidrogel Arena	99 ± 2	2 ± 0,4	2,4 ± 0,1
Hidrogel Piedra	55 ± 5	0	0

Fuente: Autor

Cinética de evaporación de los hidrogeles En la (figura 4), se observa el porcentaje de evaporación de los hidrogeles en el tiempo. A los 4 días (96 horas) de exposición, el agua se había evaporado el 100%, mientras que los hidrogeles solo el 55 %. La evaporación completa de los hidrogeles se dio a los 8 días (192 horas).

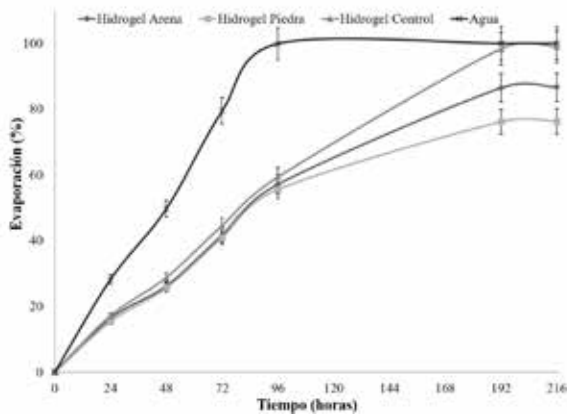


Figura 4. Evaluación del porcentaje de evaporación de los hidrogeles en el tiempo
Fuente: Autores

Teniendo en cuenta que la mayor región lineal se observó hasta los 4 días (96 horas), se procedió a determinar la cinética de evaporación de los hidrogeles como se observa en la figura 5.

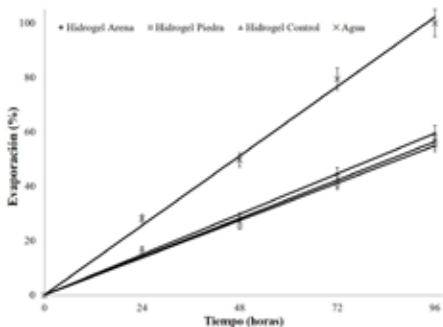


Figura 5. Evaluación del porcentaje de evaporación de los hidrogeles en el tiempo
Fuente: Autores

La cinética para los hidrogeles fue de orden cero, y las ecuaciones lineales se presentan en la tabla VI.

Tabla VI. Evaluación de la cinética de evaporación de los hidrogeles

Sistema	Ecuación	r ²
Agua	% Evaporación = (1,06 ± 0,05)*t	0,9965
Hidrogel Control	% Evaporación = (0,62 ± 0,03)*t	0,9972
Hidrogel Arena	% Evaporación = (0,59 ± 0,03)*t	0,9950
Hidrogel Piedra	% Evaporación = (0,57 ± 0,03)*t	0,9965

Fuente: Autor

Los resultados estadísticos del análisis del porcentaje de evaporación a los 4 días de exposición de los hidrogeles, se muestran en la (tabla 3). El porcentaje de evaporación de los hidrogeles no presentó diferencia significativa y fueron 60% más lentos que el agua control.

Los valores obtenidos presentaron una correlación estadísticamente significativa (p -valor $< 0,05$), con un nivel de confianza del 95%; el coeficiente de correlación para el hidrogel control, hidrogel arena e hidrogel piedra fueron de 0,9972; 0,9950 y 0,9965 respectivamente. Indicando buena proporcionalidad entre el porcentaje de evaporación y el tiempo.

Capacidad de recuperación de los hidrogeles Después de 10 días de deshidratación, los hidrogeles se sumergieron en cada uno de los tratamientos (lodo control, lodo arena y lodo piedra). Los lodos control y arena conservaron la capacidad de retención de lodo (97 mL y 48 mL), por gramo de hidrogel deshidratado, mientras que el lodo de piedra, presentó un proceso de endurecimiento, con estructura rígida y no se hidrató.

Este fenómeno se puede asociar a la interacción entre los grupos carboxilatos de las cadenas poliméricas del poliacrilato y los iones divalentes de calcio presentes en el lodo de piedra como se ilustra en la figura 6, produciendo un complejo insoluble.

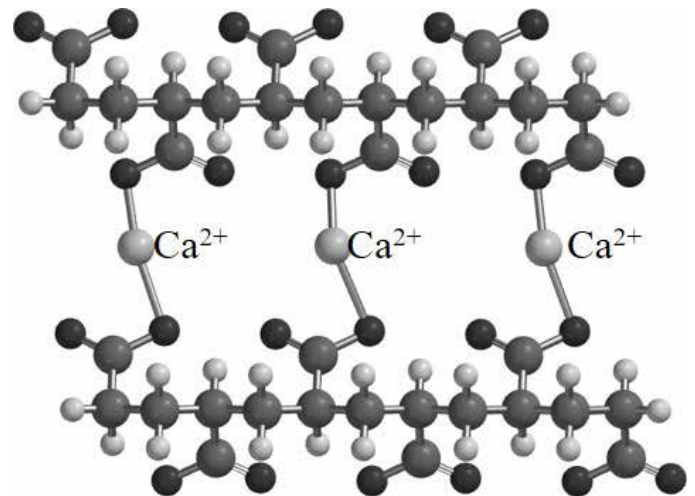


Figura 6. Representación Molecular del complejo formado por los grupos carboxilatos de las cadenas poliméricas del poliacrilato y los iones divalentes calcio.
Fuente: Autores

Caracterización microscópica de los hidrogeles Los hidrogeles luego de la deshidratación fueron caracterizados a través de microscopía electrónica de barrido (SEM) como se muestra en la figura 7. Los hidrogeles control y arena muestra una superficie heterogénea y granular, mientras que el hidrogel de lodo de piedra, presenta una superficie más homogénea indicando mayor incorporación de las partículas sólidas dentro del hidrogel y esto se debe a su menor tamaño de partícula y posiblemente a procesos de fraguado durante la pérdida de agua.

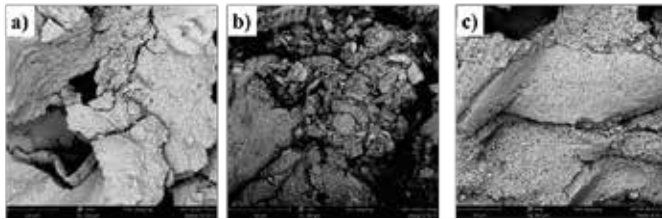


Figura 7. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) de hidrogeles: a) Lodo Control 470x; b) Lodo Arena 970x; c) Lodo Piedra a 540x; Fuente: Autores

Evaluación tipo invernadero Para la evaluación tipo invernadero se realizaron mediciones de temperatura y humedad, teniendo en cuenta que durante la prueba no se adicionó agua a ningún tratamiento. En el día 1 se evaluó el porcentaje de germinación y el día 15 el porcentaje de plantas desarrolladas.

En la (tabla VII) se observa que en el hidrogel se lograron desarrollar el 85 % de las semillas sembradas, mientras que en el suelo andisol no hubo desarrollo de las plantas debido a que cada planta está directamente influenciada por el contenido de agua y muestra un metabolismo restringido cuando el suministro de agua es limitado [18].

Tabla VII. Evaluación tipo invernadero de los hidrogeles.

	Día 1		Día 15	
	Suelo Andisol	Hidrogel lodo de Arena	Suelo Andisol	Hidrogel lodo de Arena
Humedad (%)	60	85,84	6	56,62
Temperatura (°C)	22,6	22,5	23,2	22,5
Germinación (%)	97	95	—	—
Plantas desarrolladas (%)	—	—	0	85

Fuente: Autor

El posible uso de hidrogeles a partir de lodos en los campos agrícolas, especialmente en regiones áridas y desérticas, pueden ser capaces de mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, aumentando la productividad en el sector agrícola y así reduciendo el consumo de agua de riego, reduciendo la tasa de mortalidad de las plantas y mejorando la fertilidad del suelo [17], [33].

A partir de los resultados, se evidencia que la principal ventaja es que los hidrogeles es controlar la liberación de agua almacenada a medida que el suelo se seca, manteniendo la humedad del suelo en condiciones óptimas de siembra (50-80%) durante un periodo de 15 días. Además, la presencia de hidrogel no solo aumenta la porosidad del suelo que proporciona una mejor oxigenación de las raíces [34], si no que proporciona las condiciones adecuadas para el desarrollo del 85% de las plantas.

Conclusiones

Los lodos procedentes de las aguas resultantes del lavado de arena como residuo industrial, pueden ser una alternativa para la formulación de abonos o fertilizantes orgánico-minerales líquidos, cumpliendo los requerimientos de la de la norma técnica colombiana NTC 5167.

Además, las formulaciones tipo hidrogel pueden ser utilizados para promover el crecimiento y desarrollo de las plantas como *B. dictyoneura*, la cual se asocia como base de la alimentación animal y se han encontrado en las sabanas orientales y en procesos de pastoreo continuo de bovinos en la altillanura colombiana, además, es una planta muy estudiada en la agricultura como forraje.

Respecto al lodo de piedra, aunque no es una alternativa para la elaboración de sistemas tipo hidrogeles para la recuperación de suelos áridos, se puede explorar su uso como material de construcción, como aditivo para reforzar procesos de fraguado del cemento.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la empresa CECOL-TEC S.A.S y al programa de Prácticas Profesionales de Ingeniería Biotecnológica de la Universidad Francisco de Paula Santander por la colaboración durante la ejecución de este proyecto.

Referencias

- [1] G. Vargas and C. Gomez, "La desertificación en Colombia y los cambios climaticos," 2003.
- [2] Z. Masri, S. Van Donk, A. Bruggeman, and F. Turkelboom, "Post-harvest summer tillage to control wind erosion in the Khanasser," *Aeolian Res.*, vol. 17, pp. 219–229, 2015.
- [3] G. Guoli, L. Jiyuan, S. Quanqin, and Z. Jun, "Sand-Fixing Function under the Change of Vegetation Coverage in a Wind Erosion Area in Northern China Sand- fi xing Function under the Change of Vegetation Coverage in a Wind Erosion Area in Northern China," vol. 5, no. 2, pp. 105–114, 2014.
- [4] P. Taylor, S. Hu, S. Hu, and Y. Fu, "Co-melting technology in resource recycling of sludge derived from stone processing Co-melting technology in resource recycling of sludge derived from stone processing Shao-Hua," no. May 2015, pp. 37–41, 2012.
- [5] F. Chang, M. Lee, S. Lo, and J. Lin, "Arti ficial aggregate made from waste stone sludge and waste silt," *J. Environ. Manage.*, vol. 91, no. 11, pp. 2289–2294, 2010.
- [6] A. A. Juwarkar and H. P. Jambhulkar, "Phytoremediation of coal mine spoil dump through integrated biotechnological approach," vol. 99, pp. 4732–4741, 2008.
- [7] Z. Liu, Y. Miao, Z. Wang, and G. Yin, "Synthesis and characterization of a novel super-absorbent based on chemically modified pulverized wheat straw and acrylic acid," *Carbohydr. Polym.*, vol. 77, no. 1, pp. 131–135, 2009.

- [8] V. Kumar, M. Kumari, and R. Kumar, "Graft copolymers from cellulose: Synthesis, characterization and evaluation," *Carbohydr. Polym.*, vol. 97, no. 1, pp. 18–25, 2013.
- [9] W. Bres and L. A. Weston, "Influence of gel additives on nitrate, ammonium, and water retention and tomato growth in a soilless medium," *HortScience*, vol. 28, no. 10, pp. 1005–1007, 1993.
- [10] C. Ross, R. Sojka, and J. Foerster, "Scanning electron micrographs of polyacrylamide-treated soil in irrigation furrows," *J. Soil Water Conserv.*, vol. 58, no. 5, pp. 327–331, 2003.
- [11] B. Rojas et al., "Estudio de la germinación de semillas de tomate en suelos áridos extraídos de la península de Araya (Venezuela) al utilizar polímeros de tipo hidrogeles," *Rev. Iberoam. Polímeros*, no. June 2014, 2004.
- [12] C. A. Rivera, C. A. Baeza, and W. Chavarriaga, "Efecto de un retenedor de agua y dosis crecientes de fertilizantes foliares sobre la producción de tomate chonto y larga vida bajo cubierta plástica agroclear," *Agronomía*, p. 15: 103-119, 2007.
- [13] H. Idrobo, A. M. Rodríguez, and J. Díaz O, "Comportamiento del hidrogel en suelos arenosos," *Ing. Rec. Nat. Amb*, p. 9: 33-37, 2010.
- [14] I. A. Katime, "Hidrogeles inteligentes," *Rev. Iberoam. Polímeros*, p. 1: 1-42., 2003.
- [15] J. A. C. Alburquerque, V. L. A. Lima, D. Menezes, C. A. Azevedo, N. Dantas, and J. Silva, "Características vegetativas do coentro submetido a doses do polímero hidroabsorvente e lâminas de irrigação 1 Vegetative characteristics of coriander submitted to doses of the hydrogel polymer and water depths," *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, no. 81, pp. 671–679, 2009.
- [16] G. Navarro, "Agricultura Orgánica y Alternativa. Universidad Autónoma Chapingo," Chapingo, Texcoco, México.2009.
- [17] C. G. Chiochetta, S. Cotelle, J. Masfarau, and H. Toumi, "Use of agro-industrial organic sludge amendment to remediate degraded soil: chemical and eco (geno) toxicological differences between fresh and stabilized sludge and establishment of application rates," 2015.
- [18] S. Hwa, S. Yeon, J. Seul, I. Kim, and E. Young, "Application of sodium polyacrylate and plant growth-promoting bacterium, Micrococcaceae HW-2, on the growth of plants cultivated in the rooftop," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 113, pp. 297–303, 2016.
- [19] R. J. L. Mendoza and C. J. Macías, "Materia Orgánica, su Importancia en el Mantenimiento y Mejoramiento de la Fertilidad de los Suelos," *Cent. Investig. Reg. del Noroeste. INIFAP. Los Mochis, Sinaloa, México.*, p. 32, 1998.
- [20] S. A. Pedroza and B. S. Duran, "Efecto del acolchado plástico, fertilización nitrogenada y composta orgánica en el crecimiento y desarrollo de sábila *Aloe barbadensis* Miller con riego por goteo automatizado," *Rev. Chapingo-serie Zo. áridas*, vol. 4, pp. 1–7, 2005.
- [21] C. I. Gutiérrez, C. Sánchez, W. Cueto, C. Trucios, C. Trejo, and H. Flores, "efecto del polímero AQUASTOCK® en la capacidad de retención de humedad del suelo y su efecto en el rendimiento de la acelga (*Beta vulgaris* var *cycla*)," *Rev. Chapingo Ser. Zo. Arid.*, vol. 7, pp. 65–72, 2008.
- [22] D. C. Galeş, L. Răus, C. Ailincăi, and G. Jitoreanu, "The influence of Aquasorb on morpho-physiological properties on corn and soybeans yield, in the conditions of Iasi County.," *Agron. Ser. Sci. Res. Ştiinţifice*, p. 55:173-178, 2012.
- [23] S. A. Pedroza, C. L. G. Yanez, C. I. Sanchez, and G. J. Samaniego, "Effect of Hydro Gel and Vermicompost on Corn Production," *Rev. Fitotec. Mex.*, vol. 38, no. 4, pp. 375–381, 2015.
- [24] E. Kosterna, A. Zaniewicz-Bajkowska, R. Rosa, and J. Franczuk, "The effect of AgroHydroGel and irrigation on celeriac yield and quality," *Folia Hortic.*, vol. 24, no. 2, pp. 123–129, 2012.
- [25] B. Rojas, M. Rampirez, R. Aguilaera, J. L. Prin, and C. Torres, "Los hidrogeles poliméricos como potenciales reservorios de agua y su aplicación en la germinación de semillas de tomate en diferentes tipos de suelos," *Rev. Iberoam. Polímeros.*, vol. Volumen 7(, p. 199–210., 2006.
- [26] J. C. Ríos-Saucedo, M. Rivera-González, L. Valenzuela-Núñez, R. Trucios-Casiano, E. Roman-Paoli, and D. Sotomayor-Ramírez, "Diagnóstico de las reforestaciones de mezquite y mé- todos para incrementar su sobrevivencia en Durango, México.," *Rev. Chapingo Ser. Zo. Áridas*, p. 11:63-67, 2012.
- [27] J. Chen et al., "Science of the Total Environment Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment," *Sci. Total Environ.*, vol. 613–614, pp. 829–839, 2017.
- [28] C. Arroyave Q., P. Araque M., and C. A. Pelaez J., "Evaluación de la bioacumulación y toxicidad de cadmio y mercurio en pasto llanero (*Brachiaria dictyoneura*)," *Vitae*, vol. 17, no. 1, pp. 45–49, 2010.
- [29] F. Laich, "El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje," pp. 1–7, 2011.
- [30] K. Amprayn, M. T. Rose, M. Kecskés, L. Pereg, H. Thanh, and I. R. Kennedy, "Plant growth promoting characteristics of soil yeast (*Candida tropicalis* HY) and its effectiveness for promoting rice growth," vol. 61, pp. 295–299, 2012.
- [31] A. Botha, "Soil Biology & Biochemistry The importance and ecology of yeasts in soil," vol. 43, 2011.
- [32] I. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5167 (Segunda actualización)." pp. 1–51, 2011.
- [33] A. M. Elbarbary, H. A. A. El-rehim, N. M. El-sawy, E. A. Hegazy, and E. A. Soliman, "Radiation induced crosslinking of polyacrylamide incorporated low molecular weights natural polymers for possible use in the agricultural applications," *Carbohydr. Polym.*, vol. 176, no. April, pp. 19–28, 2017.
- [34] M. R. Guilherme et al., "Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review," *Eur. Polym. J.*, vol. 72, pp. 365–385, 2015.