

Propuesta de una metodología de laboratorio para la medición del coeficiente de difusión
del suelo

Laura Daniela Reyes Mardini & Carlos Andrés Arenas Ortega

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería Civil

Director

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

PhD. en Ingeniería

Codirector

Hebenly Celis Leguizamo

M. Sc. Ciencias de Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

Dedicatoria y Agradecimientos

A Dios por permitirnos llegar a este momento tan especial donde culmina nuestra carrera. Por los triunfos y dificultades que nos enseñaron a valorar cada día más.

A nuestros padres por ser quienes nos acompañaron y apoyaron incondicionalmente durante todo el trayecto estudiantil y de vida.

A nuestros amigos y compañeros, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas.

Finalmente, a la Universidad Industrial de Santander, la escuela de Ingeniería Civil, maestros y nuestros directores, gracias por su tiempo, su apoyo, así como por la sabiduría transmitida en el desarrollo de nuestra formación académica.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Objetivos	10
1.1. Objetivo General	10
1.2. Objetivos Específicos.....	10
2. Cuerpo del trabajo	11
2.1. Marco referencial	11
2.1.1. Marco teórico	11
2.1.1.2. Ley de Fick.	13
3. Metodología	14
3.1 Revisión Bibliográfica	14
3.2 Métodos para la obtención del coeficiente de difusión.....	16
3.2.1 Método Estacionario o Difusión Continua	16
3.2.2. Método de Time-Lag	20
3.3.3 Método de Columnas	23
3.3.4. Método De Half-Cell (Celda media).....	25
3.3.5 Método de Dialysis-leaching	28
3.4. Matriz de decisión.....	35
3.5. Procedimiento de Ensayo Dyalysis-Leaching	36
3.6. Presupuesto	38
4. Conclusiones	40
5. Recomendaciones.....	41
Referencias Bibliográficas	42
Apéndices.....	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Valoración de la complejidad en los Métodos	36
Tabla 2. Presupuesto de Laboratorio para el método Dialysis-Leaching	39

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo de la revisión bibliográfica.....	15
Figura 2. Equipo usado en el método Estado Estacionario.....	18
Figura 3. Resultados del ensayo de difusión en estado estacionario	19
Figura 4. Esquema del time-lag.	21
Figura 5. Gráfica Q_t vs t	22
Figura 6. Diagrama del equipo de ensayo de difusión en columnas.....	24
Figura 7. Diagrama del método de Celdas medias	26
Figura 8. Concentración a lo largo de la Celda.....	27
Figura 9. Suelo saturado con C_o de la solución contaminante.....	30
Figura 10. Representación de la diálisis	31
Figura 11. Proceso de Diálisis	32
Figura 12. Correlación entre EC y concentración de sal	33

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Presupuesto general del método Estacionario.....	47
Apéndice B. Presupuesto general del método Time-Lag	48
Apéndice C. Presupuesto general del método de Columnas.....	49
Apéndice D. Presupuesto general del método de Celdas Medias	50
Apéndice E. Relaciones para determinar el factor adimensional G.....	51
Apéndice F. Diagrama del método Dialysis-Leaching	52

Resumen

Título: Propuesta de una metodología de laboratorio para la medición del coeficiente de difusión del suelo*

Autor: Laura Daniel Reyes Mardini, Carlos Andrés Arenas Ortega**

Palabras Clave: Suelo, Contaminante, Coeficiente de Difusión, Método de medición, Laboratorio.

En este documento se define una metodología para obtener el coeficiente de difusión de un suelo en laboratorio, mediante la recopilación bibliográfica acerca del proceso de difusión que ocurre entre suelos y soluciones contaminadas que entran en contacto con él. Este coeficiente se utiliza cuando se requiere modelar el transporte de un contaminante en el suelo. En el artículo se describen brevemente las metodologías de estado estacionario, time-lag, columnas, celdas medias y lixiviación por diálisis (dialysis-leaching) que han sido desarrolladas durante los últimos años y que a su vez son las más comunes para determinar este coeficiente. En este estudio se busca hacer énfasis en algunas de las ventajas dentro de las cuales se encuentran, por ejemplo, la duración del ensayo y las desventajas que pueden llegar a presentar cada una de las metodologías al momento de llevarlas a cabo. Mediante una matriz de decisión se estudian y analizan algunos factores tales como el montaje del equipo, la duración del ensayo y el costo para poder escoger un método que se adapte a los requerimientos mencionados. Por último, con base en el análisis que se realizó se generó una guía con el procedimiento de laboratorio, los materiales, el equipo y el respectivo presupuesto que se requiere para llevar a cabo el ensayo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Ph. D. Ingeniería de la Universidad Politécnica de Cataluña. Codirector: Hebenly Celis Leguizamo. M. Sc. Ingeniería Civil Área Geotecnia de la Universidad de Puerto Rico.

Abstract

Title: Proposal of a laboratory methodology for the measurement of diffusion coefficient in soils*

Author: Laura Daniel Reyes Mardini, Carlos Andrés Arenas Ortega**

Key Words: Soil, Solute, Diffusion Coefficient, Measurement Method, Laboratory.

In this paper, a methodology is defined to obtain the diffusion coefficient of a soil in the laboratory, by a literature review about the diffusion process that occurs between soils and contaminated solutions that come into contact with it. This coefficient is used when it is required to model the transport of a pollutant in the soil. Steady-state, time-lag, column, mid-cell, and dialysis-leaching methodologies are briefly described. In addition, emphasis is placed on the advantages, such as the duration of the trial and the disadvantages of each at the time of carrying them out. Through a decision matrix, some factors such as complexity, reliability, duration, and cost are studied and analyzed in order to determine the methodology that best adapts to the mentioned factors. Finally, based on the analysis that has been made, a proposal based on the dialysis-leaching methodology is presented, in which the laboratory procedure, the materials and the equipment required to carry it out are detailed and an equipment budget at the time of publication of this paper is delivered to be used for a further development by the interested organizations.

* Degree work

** Faculty of Physicmechanical. Civil Engineering School. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Ph. D. Engineering of University Polytechnical of Cataluña. Codirector: Hebenly Celis Leguizamo. M. Sc. Civil Engineering Geotechnics Area of University of Puerto Rico.

Introducción

El creciente consumismo y la actividad del hombre en las últimas décadas ha llevado a generar grandes proporciones de residuos descartables que bajo condiciones de presión, temperatura y humedad se degradan a tal punto de convertirse en sustancias contaminantes, las cuales en su mayoría inevitablemente terminan en los suelos.

Cuando un contaminante entra en contacto con el suelo se produce una serie de procesos que lo transportan; esta movilización se ve afectada por la composición y características fisicoquímicas tanto de la sustancia como del suelo (Lenoir & Tornari, 2004). Para limitar el transporte de los contaminantes es común encontrarse con el uso de suelos arcillosos, arcillas mejoradas con polímeros que funcionan como barreras de contención debido a su baja conductividad hidráulica. Sin embargo, los estudios realizados en los últimos 30 años en este campo han indicado que el proceso de difusión se convierte en el mecanismo de transporte dominante en relación con el proceso de advección en este tipo de suelos (Shackelford & Daniel, 1991).

Debido a la necesidad de evaluar la difusión de los contaminantes en los suelos se han desarrollado diferentes metodologías, unas más tradicionales que requieren de un mayor esfuerzo y tiempo de análisis, mientras que por otro lado se encuentran metodologías desarrolladas recientemente que son menos complejas de llevar a cabo pero que aún se encuentran en proceso de calibración.

Esta investigación tiene como objeto recopilar y comparar los diversos métodos de evaluación del coeficiente de difusión en laboratorio, además se establecerá una metodología que pueda ser realizada y calibrada en estudios posteriores por la Universidad Industrial de Santander.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Definir una metodología para obtener el coeficiente de difusión de un suelo en laboratorio.

1.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre los métodos para medir el coeficiente de difusión.
- Describir los procedimientos más adecuados para determinar el coeficiente de difusión y establecer las ventajas y desventajas de cada método.
- Establecer un presupuesto para construir un equipo de laboratorio para obtener el coeficiente de difusión.

2. Cuerpo del trabajo

2.1. Marco referencial

2.1.1. Marco teórico

La emisión de un contaminante en el medio ambiente es comúnmente originada por procesos fisicoquímicos de los residuos del hombre, tratamientos de los efluentes líquidos o por los rellenos sanitarios como resultado de la liberación de lixiviados. Cuando el contaminante es liberado en el medio ambiente es directamente afectado por procesos de transporte, transformación y/o acumulación. Entender este tipo de procesos permiten evaluar el impacto que tendrá la emisión del contaminante en los suelos y cuerpos de agua, lo que termina siendo un factor fundamental a la hora de diseñar los programas de monitoreo y control (Martínez, 2005).

2.1.1.1. Transporte de Contaminantes. Cuando un contaminante en forma de soluto entra en contacto con el suelo afronta dos posibles escenarios (Sánchez, 2012). En el primero, el contaminante interactúa con las sustancias presentes en el agua subterránea y el suelo; a este tipo de contaminantes se les conoce como solutos reactivos y presentan procesos de transporte como la adsorción, precipitación o disolución que generalmente no son modelados en los estudios de transporte de solutos en el medio. Por otra parte, están los contaminantes que no interactúan con las sustancias presentes en el suelo, a los que se le conoce como contaminantes no reactivos o conservativos; estos solutos se ven afectados por propiedades como la materia orgánica presente en el suelo, la permeabilidad, la profundidad del nivel freático, la porosidad y el tipo de suelo. Los procesos de transporte que dominan en este escenario son la advección, la dispersión y la difusión.

La advección es el movimiento del soluto en respuesta al flujo del agua (Chamorro & López, 2016), en el hipotético escenario en el que solo se presentara este proceso, el soluto viajaría a la misma dirección y velocidad que la corriente subterránea de agua (Sánchez, 2012). Este proceso está definido por la ley de Darcy en donde el flujo es directamente proporcional al coeficiente de permeabilidad (k).

Sin embargo, los solutos no reactivos que viajan a la misma velocidad de flujo del agua tienden a ser esparcidos de la trayectoria que se espera del proceso de advección, causando en muchos casos la dilución del soluto. Este proceso es conocido como dispersión hidrodinámica. A nivel microscópico se pueden observar tres mecanismos por los que es causada la dispersión. El primero ocurre en los canales capilares ya que las moléculas viajan a diferentes velocidades en diferentes puntos a largo del canal debido a la resistencia ejercida en el fluido por la rugosidad en la superficie de los poros. La segunda causa es por la diferencia en los tamaños de los poros a lo largo de la trayectoria del flujo. Y la tercera está relacionada con la tortuosidad y ramificación de los canales capilares (Freeze & Cherry, 1979).

El otro proceso de transporte presente es la difusión, en la cual las moléculas del soluto se mueven bajo la influencia de su actividad cinética en la dirección del gradiente de concentración, que junto a la dispersión son un mecanismo que describen el transporte, la mezcla o dilución molecular del soluto.

Cuando hay flujo presente en el suelo, la dispersión es el proceso dominante mientras que la difusión se puede considerar despreciable. Pero cuando la velocidad del flujo es cercana a cero o inexistente, como sucede en suelos finos como las arcillas, la difusión adquiere relevancia siendo el proceso dominante en el transporte de solutos contaminantes. Este es un escenario bastante

común en las barreras de suelo que son tradicionalmente diseñadas para contener los desechos (Shackelford & Daniel, 1991).

2.1.1.2. Ley de Fick. El coeficiente de difusión D_0 es el parámetro fundamental que gobierna la difusión de los solutos y es afectado por factores como la temperatura, viscosidad y la constante dieléctrica de la solución, el radio y valencia del soluto, el grado de asociación y disociación del soluto y la concentración del soluto (Quigley et al., 1987).

La masa de una sustancia difundiendo a través del área transversal por unidad de tiempo es proporcional al gradiente de concentración. Esto es descrito en la primera ley de Fick para una solución acuosa:

$$J_D = -D_0 \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

En donde J_D es el flujo de masa difusivo, C es la concentración de la fase acuosa de la solución, x es la dirección de transporte, D_0 es el coeficiente de difusión [L^2/t]. En medios porosos saturados como los suelos, la porosidad del medio y la presencia de partículas sólidas en los poros provoca que la trayectoria del flujo sea serpenteante (tortuosidad), por lo tanto, la ley de Fick es ajustada para medios porosos y se describe de la siguiente manera:

$$J_D = -\varepsilon \tau_a D_0 \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

En donde ε es el factor de porosidad y τ_a es el factor de tortuosidad aparente (Shackelford & Daniel, 1991). Los intentos por medir el factor de tortuosidad para este medio no son confiables, por lo tanto, la Ecuación 2 es simplificada:

$$J_D = -\varepsilon D^* \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

En donde, D^* es el coeficiente de difusión efectivo [l^2/t]. Por lo general, en la literatura el coeficiente de difusión efectivo incluye en su definición la porosidad, por lo tanto, la Ecuación 3 queda escrita de la siguiente manera (De Soto et al., 2012):

$$J_D = -D_e \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

En donde a D_e también se le conoce como coeficiente de difusión efectivo [l^2/t].

La segunda ley de Fick describe como se distribuye la concentración del soluto en el tiempo, resulta de la combinación de la primera ley de Fick con la conservación de la masa (Shackelford & Moore, 2013). Se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D^*}{R_d} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{D_e}{\alpha} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

En donde, R_d es el factor de retraso (valor que depende de las características de sorción de los diferentes suelos) y D_a es el coeficiente de difusión aparente (Shackelford & Daniel, 1991).

3. Metodología

3.1 Revisión Bibliográfica

Para este proyecto de investigación, se realiza la revisión bibliográfica con el fin de conocer cuál es el estado actual del tema, los últimos aportes que se han hecho y qué tanto interés existe sobre el coeficiente de difusión. Este permite un análisis crítico sobre el fenómeno abordado con sus respectivos autores, fechas y países de publicación.

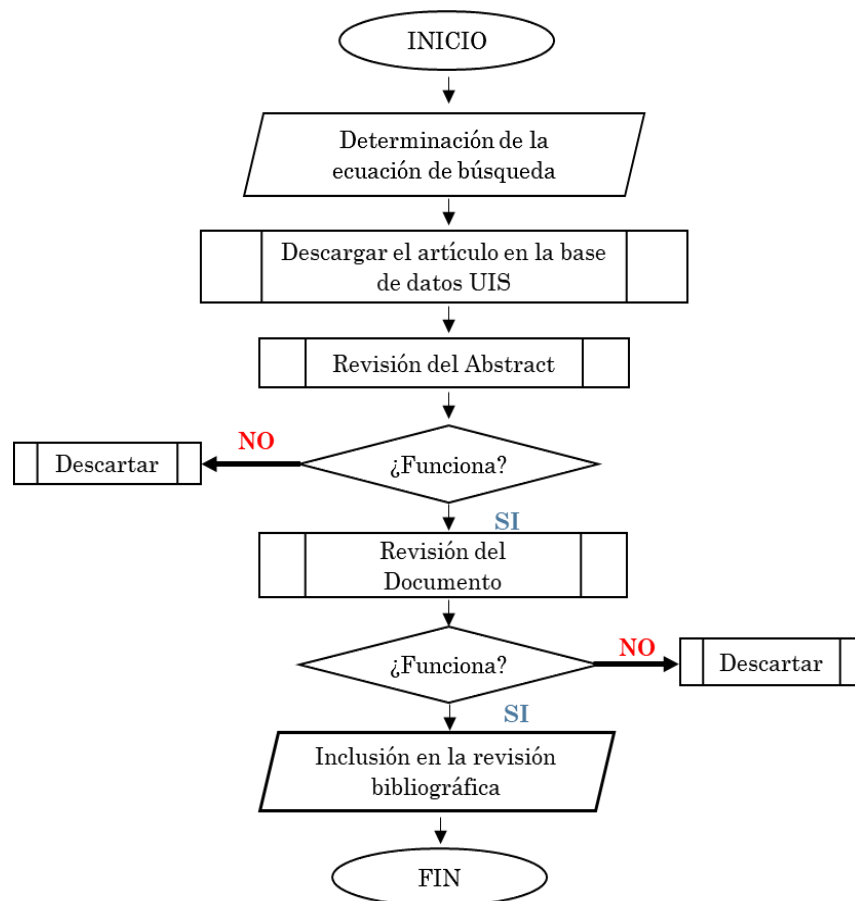
La revisión de las investigaciones se realiza en las principales bases de datos electrónicas de los artículos científicos, como ResearchGate, Google Scholar y la base de datos de la Biblioteca UIS. Las palabras clave que se emplearon son: Suelo, transporte de contaminantes y difusión.

Posteriormente, se descargan los artículos de la base de datos, se hace la revisión del resumen de cada uno, en la cual se descartan aquellos que no resulten provechosos para la investigación y se incluyen en la bibliografía aquellos que sean prometedores.

Tras la recopilación de los artículos, se separaron los que consisten sobre el transporte de contaminantes de aquellos que ahondaban en el tema de la difusión. Estos últimos se clasificaron de acuerdo con la metodología que se utilizó para determinar el coeficiente de difusión.

Figura 1.

Diagrama de flujo de la revisión bibliográfica



Nota: El diagrama muestra el proceso de recopilación y revisión de los artículos de investigación para el proyecto.

3.2 Métodos para la obtención del coeficiente de difusión

A continuación, se analizan y describen los diversos métodos para la obtención del coeficiente de difusión efectivo o aparente (depende del método) en el laboratorio tales como estado estacionario, time-lag, columnas, celdas medias y lixiviación por diálisis (dialysis-leaching).

3.2.1 Método Estacionario o Difusión Continua

Este método es tradicionalmente usado desde la década del 50 en la mayoría de los estudios para el análisis de la difusión y de otros parámetros químico-físicos del suelo. Husted & Low (1954) propusieron un sistema que requiere que el suelo llegue a una condición tal que, si se analiza cualquier punto de flujo en el suelo su magnitud y dirección son constantes en el tiempo, esto es conocido como estado estacionario.

La primera ley de Fick postula que existe un gradiente de concentración el cual genera que exista un flujo de una región con altas concentraciones de solutos a zonas con concentraciones menores. Esta metodología describe como al concentrarse solutos en una muestra se transforman en masa acumulada por unidad de superficie (Q_t) (Sample-Lord et al., 2017), que se expresa de la siguiente manera:

$$Q_t = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{N_s} \Delta m_i = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{N_s} C_{b,i} \Delta V_i \quad (6)$$

Donde,

A = Área de la sección transversal de la muestra.

Δm_i = Incremento de masa a lo largo del tiempo.

$C_{b,i}$ = Concentración de la masa en el incremento del volumen (ΔV_i).

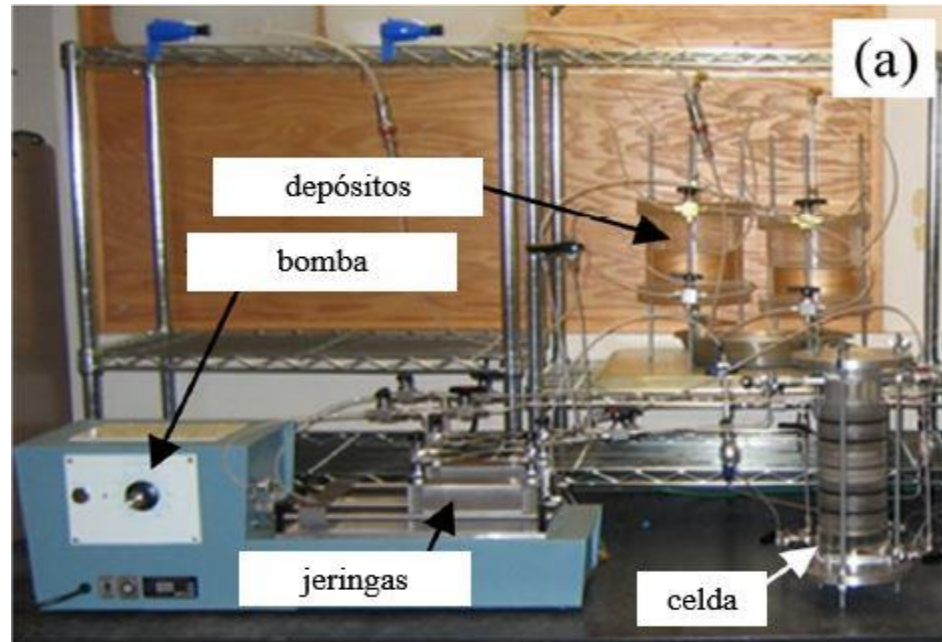
N_s = Número de muestras en incremento con respecto al total de datos.

Para apreciar de manera más detallada el equipo podemos ver la Figura 2, en este ensayo se dispone de un sistema de tuberías en la parte superior en la que circulan de forma secuencial dos soluciones de Cloruro de Calcio (CaCl_2) con diferentes concentraciones (la primera de 0,005M y la segunda de 0,01M) (Sample-Lord et al., 2017) mientras que en la base de la membrana circula agua desionizada (DIW); después se confina una muestra de suelo arcilloso o suelo mejorado en una celda de pared rígida. Durante el transcurso del ensayo se observa un gradiente de concentración dando como resultado la difusión de cationes y aniones del cloruro y por ende la transferencia de masa en estado estacionario (Sample-Lord et al., 2017).

Es necesario que el gradiente de concentración se mantenga a lo largo de todo el ensayo, por lo tanto, se abastece constantemente la solución del contaminante y se va reemplazando el agua desionizada.

Figura 2.

Equipo usado en el método Estado Estacionario



Nota. La foto muestra el montaje del equipo de laboratorio para realizar la medición del coeficiente de difusión mediante el método estacionario. Adaptado de *Diffusion of Calcium Chloride through Polymerized Bentonite* (p. 203), por Sample-Lord, 2017, Geotechnical Frontiers.

Los materiales y equipo en la Figura 1 incluyen una celda de prueba, un sistema de bomba de flujo con dos actuadores de acero inoxidable (jeringas), tubería de acero inoxidable para controlar la circulación de soluciones de electrolitos en los límites de la muestra de suelo, un transductor de presión diferencial y acumuladores de vejiga para recoger las soluciones en circulación y rellenar los actuadores.

Para determinar el coeficiente de difusión efectiva, D_e , en la Figura 3 se realiza una regresión lineal a partir de los datos en estado estacionario con una pendiente $\Delta Q_t / \Delta t$ obteniendo entonces la siguiente expresión (Sample-Lord et al., 2017).

$$D_e = \left(\frac{\Delta Q_t}{\Delta t} \right) \left(\frac{L}{nW_A \Delta C} \right) \quad (7)$$

Donde,

L= Espesor de la muestra.

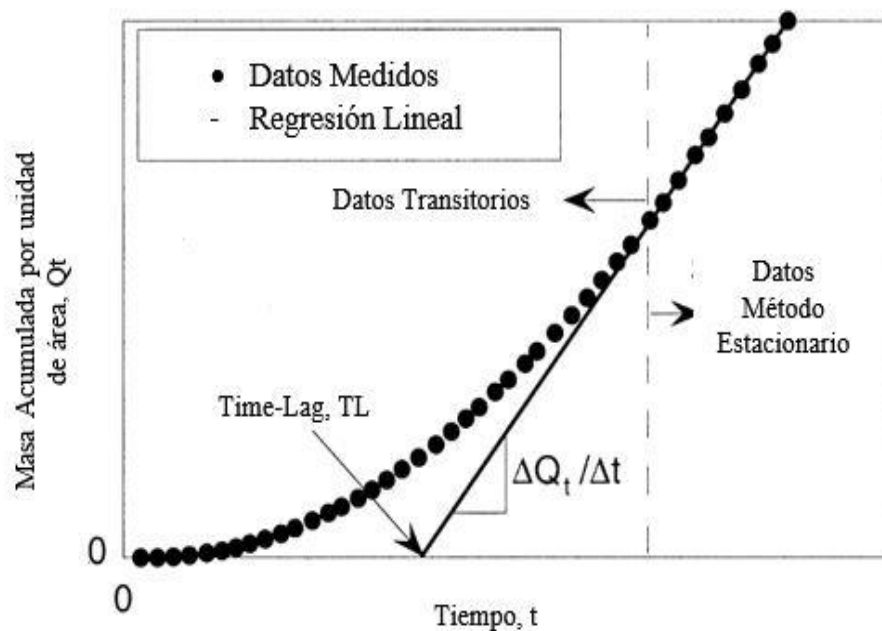
n= Porosidad de la muestra.

W_A= Peso atómico del soluto difusor.

ΔC = Diferencia de concentración molar del soluto a través de la muestra.

Figura 3.

Resultados del ensayo de difusión en estado estacionario



Nota: Ilustración esquemática de los resultados del ensayo de difusión del estado estacionario. Adaptado de *A Laboratory Apparatus to Measure Chemico-Osmotic Efficiency Coefficients for Clay Soils* (p. 237), por C. Shackelford, 2001, Geotechnical Testing Journal.

Uno de los grandes obstáculos de esta metodología son los largos periodos de tiempo que se necesitan para establecer la condición de estado estacionario en el suelo (150-200 días) y la

complejidad que conlleva mantener la muestra en dicho estado todo el tiempo, además de su alto costo de aproximadamente \$16.000.000COP (ver detalle en Apéndice A).

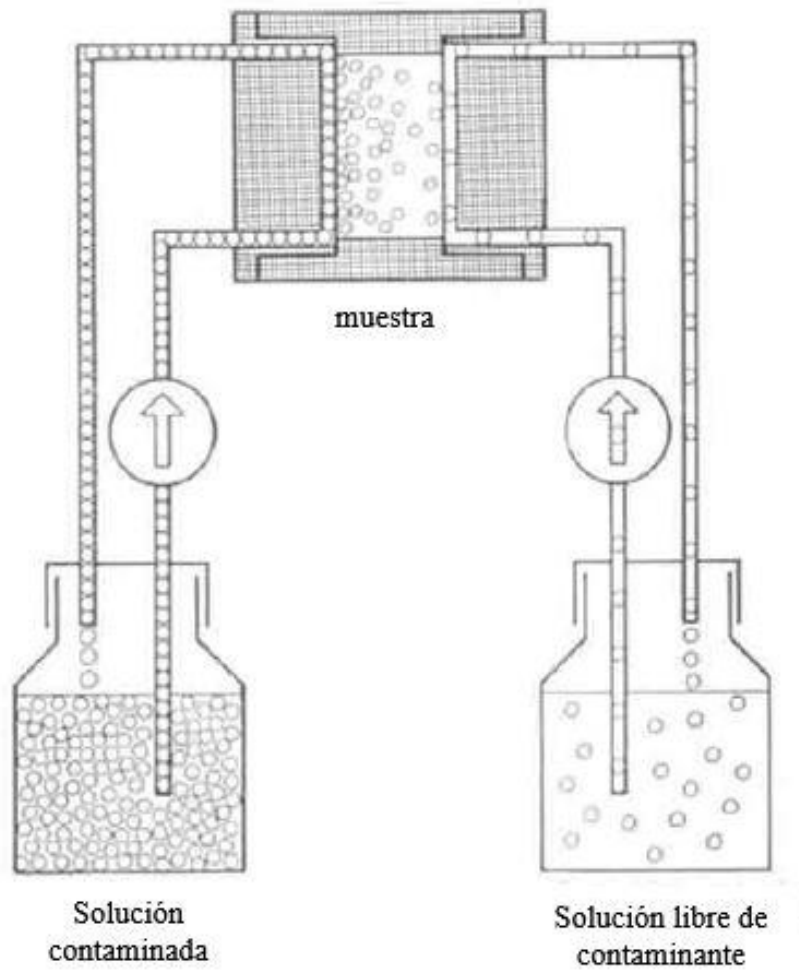
3.2.2. Método de Time-Lag

Esta técnica es una variante al método anterior que tiene como base establecer las condiciones de estado estacionario en el suelo para obtener el coeficiente de difusión y la constante de permeabilidad (Jost, 1960) (Crank, 1975). La diferencia parte de que no hay que mantener esas condiciones durante toda la duración del ensayo.

Se establece como condición inicial la concentración de la solución contaminante presente en el suelo igual a cero; como se aprecia en la Figura 4, en un costado de la muestra de suelo se pone a circular la solución del contaminante, mientras que en el otro costado circula una solución libre del contaminante, por el gradiente de concentración que existe, parte del contaminante se difunde a través del suelo hacia la solución libre, Gradualmente el suelo es saturado y el flujo a través de este alcanza el estado estacionario (Muurinem, 1990).

Figura 3.

Esquema del time-lag.



Nota. Montaje del ensayo de difusión mediante Time-Lag. Adaptado de *Diffusion of Uranium in Compacted Sodium Bentonite* (p. 360), por A. Muurinem, 1990, Elsevier Science Publishers B.V.

La cantidad total de la solución difundiéndose por área de la sección transversal Q_t , mientras el suelo alcanza el estado estacionario ($t \rightarrow \infty$) se define como.

$$Q_t = \left(\frac{nD^*C_1}{L} \right) \left(t - \frac{R_d L^2}{6D^*} \right) \quad (8)$$

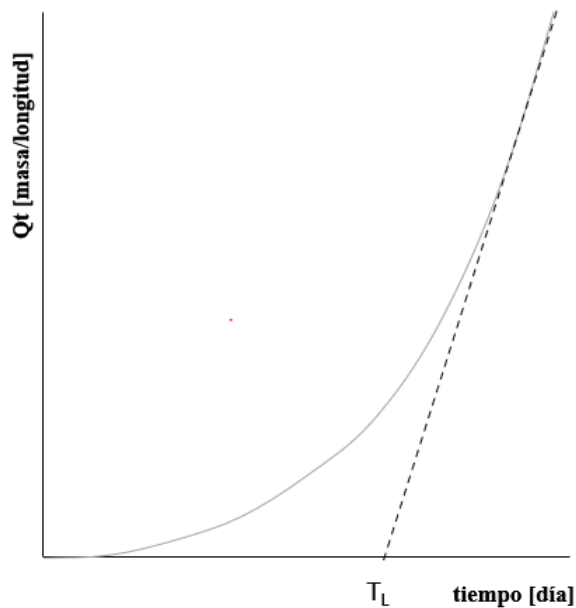
Donde,

$$Q_t = \int_0^t J_D dt \quad (9)$$

En la que J_D es el flujo difusivo, L es el espesor de la muestra en metros y c_1 es la concentración de la solución contaminante que está fluyendo en el recipiente origen y que se mantiene constante a lo largo de todo el procedimiento. Con los datos obtenidos del ensayo se gráfica Q_t vs t , dando como resultado una curva de avance en la que posteriormente se traza una asíntota a esta curva. El punto en donde se crucen la asíntota y el eje del tiempo se le conoce como time-lag (T_L).

Figura 4.

Gráfica Q_t vs t .



Nota: El gráfico representa la cantidad de solución que se difunde en el suelo a lo largo del tiempo

La Ecuación 8 se puede simplificar de la siguiente manera:

$$T_L = \frac{R_d L^2}{6D^*} \quad (10)$$

Conociendo el valor de T_L Con la Ecuación 3 se calcula el coeficiente de difusión efectivo. Sin embargo, es necesario conocer el factor de retardo adimensional R_d , que representa la velocidad relativa de transporte de un soluto no reactivo (e.g. Cl^-) respecto a un soluto reactivo que está sujeto a reacciones reversibles de absorción o intercambio de equilibrio. Para solutos no reactivos es posible asumir este factor igual a 1 (Freeze & Cherry, 1979).

Esta metodología no requiere de un control tan riguroso en las condiciones del ensayo respecto al método del estado estacionario, ya que solo es necesario establecer las condiciones de estado estacionario en el suelo más no mantenerlas (Shackelford, 1990), sin embargo, el tiempo para establecer estas condiciones puede llegar a ser excesivo y requerir entre 150 a 200 días (Muurinem,1990). Por otro lado, el equipo necesario para realizar el ensayo tiene un valor elevado (aproximadamente \$ 16.000.000 COP, ver detalle en Apéndice B).

3.3.3 Método de Columnas

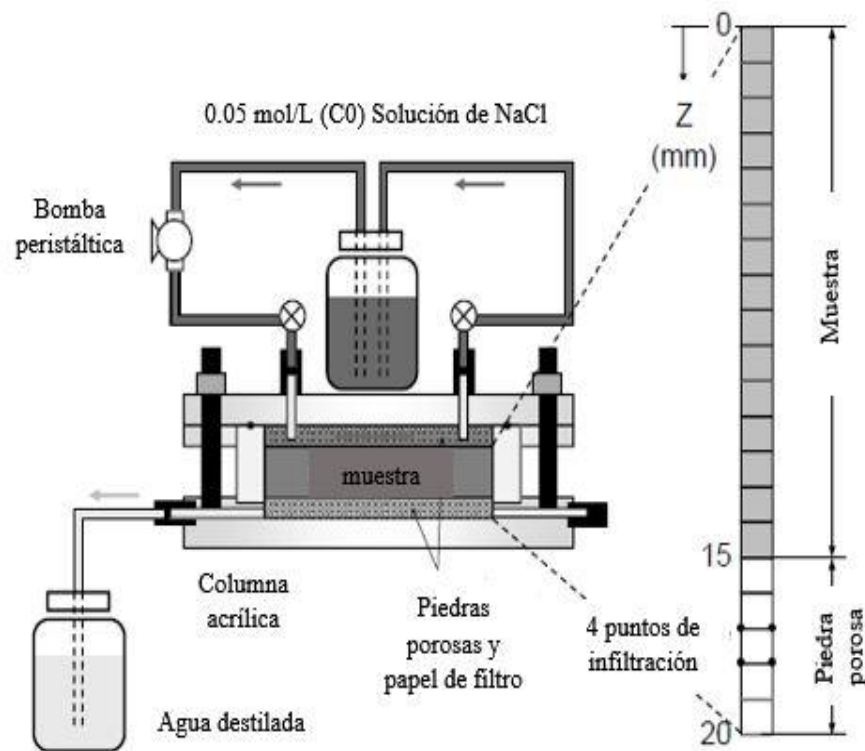
El uso de columnas de suelo para la medición del desplazamiento de un soluto fue empleado por primera vez en 1975 (Parlange & Starr, 1975). Posteriormente se desarrolla una metodología más completa utilizada en el estudio de transporte de masas a través de medios porosos (Freeze & Cherry, 1979), en la cual se determina la porosidad efectiva y el coeficiente de difusión efectivo de un suelo fino.

El procedimiento consiste en saturar de agua destilada y una concentración determinada de una solución contaminante (0,05mol/L de Cloruro de Sodio, NaCl) las piedras porosas superior e

inferior, y de esta manera se presenta un gradiente de concentración en la muestra de suelo fino. Tal como se puede apreciar detalladamente en la Figura 6.

Figura 5.

Diagrama del equipo de ensayo de difusión en columnas



Nota: Montaje del ensayo de difusión mediante Columnas. Adaptado de *Solute transport in soil-bentonite cutoff walls considering chemical diffusion* (p. 3204), por A.Takai, 2017, 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Para este ensayo primero se engrasa de silicona la superficie de la pared interior de una columna cilíndrica para evitar el flujo a lo largo de una pared lateral, esta columna tiene un diámetro interior de 10,0 cm y una altura de 1,5 cm. En segundo lugar, después de colocar un papel de filtro se satura la piedra porosa inferior con agua destilada y se llena de suelo fino la columna.

En tercer lugar, la piedra porosa superior y una tapa se montan firmemente y, a continuación, se inyecta agua destilada de abajo hacia arriba mediante una bomba peristáltica para saturar la muestra. Por último, tras la saturación de la muestra, se inyecta 0,05mol/L de solución de NaCl y se hace circular en la piedra porosa superior con la solución mediante una bomba peristáltica (Takai et al, 2017).

Se evalúa la difusión y la advección simultáneamente bajando 90cm una botella conectada a la piedra porosa inferior para obtener la difusión y parámetros hidráulicos. La masa y concentración de NaCl en cada botella se miden en intervalos de 24h durante 15 días (Takai et al, 2017), este ensayo en total tendría un costo aproximado de 5.150.000 COP (ver detalle en Apéndice C).

Uno de los grandes puntos a favor de la metodología presentada es que ha sido estudiada y ajustada aproximadamente desde 1975 y, por lo tanto, se tiene mucho conocimiento y experiencia previa sobre esta. Por otro lado, una desventaja es que al tener presente los fenómenos de la difusión y la advección se requiere que los coeficientes de difusión efectivo y de dispersión hidrodinámica sean separados analíticamente; para que esto sea posible, se debe conocer el coeficiente de dispersión mecánica o que la velocidad de infiltración sea lo suficientemente pequeña para ser considerada nula, lo que lleva a que los ensayos requieran de duraciones muy largas debido a la realización de estos ensayos (Shackelford, 1990).

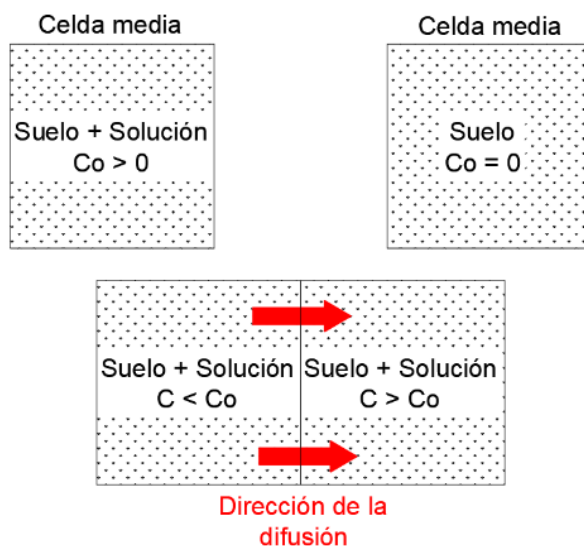
3.3.4. Método De Half-Cell (Celda media)

Este método consiste en dos celdas de suelo que son puestas una junto a la otra. En donde una celda contiene la solución contaminante, mientras que la otra no, permitiendo la difusión del soluto de una celda a la otra. A medida que el tiempo pasa, la concentración del soluto en la celda

contaminante disminuye y en la otra celda aumenta al punto de que el sistema alcanza el equilibrio (7 días), así como se puede observar en la Figura 7.

Figura 6.

Diagrama del método de Celdas medias

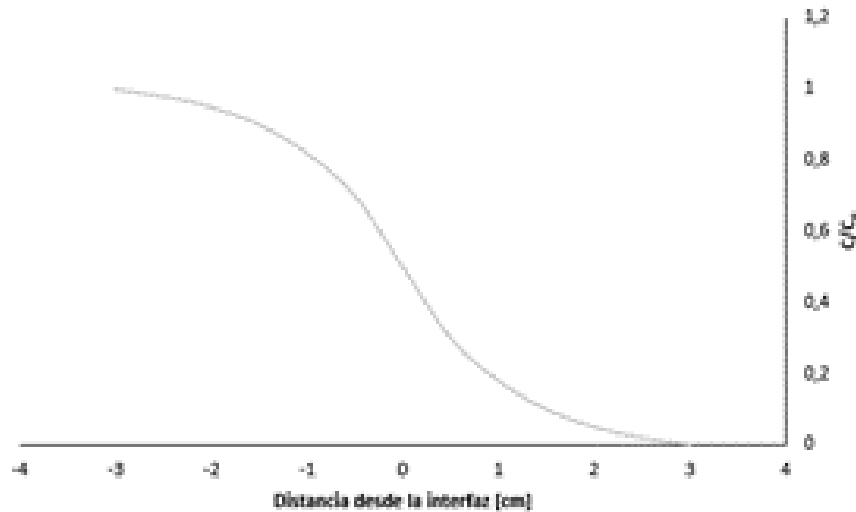


Nota: La figura representa las condiciones del suelo antes y durante el método de Celdas medias.

El tiempo estimado t en el cual ocurre el proceso de difusión depende del soluto y la interacción de este con el suelo, puede variar entre solo unas horas como sucede en el cloro a 20 días como en el estroncio (Crank, 1956). Luego del tiempo estimado las celdas son desarmadas y el suelo es seccionado en rodajas de 3 a 5 mm aproximadamente (Robin et al, 1987). Luego, se mide la concentración del soluto en diferentes puntos y se grafica el perfil de concentración (Figura 8).

Figura 7.

Concentración a lo largo de la Celda



Nota. El gráfico representa las concentraciones del soluto en diferentes puntos del suelo.

El coeficiente de difusión es obtenido mediante la ecuación 11,

$$C/C_0 = \frac{x_0}{L} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\theta_v} \exp\left(-\frac{D \theta_v^2 \pi^2 t}{L^2}\right) * \cos\left(\frac{\theta_v \pi x}{L}\right) * \sin\left(\frac{\theta_v \pi x}{L}\right) \right] \quad (11)$$

En donde x es la distancia desde la interfaz, L es la longitud total de la celda, D es el coeficiente de difusión efectivo, θ_v es el contenido volumétrico de agua (Carslaw et al, 1959).

Una de las desventajas de este método es que se requiere una gran cantidad de tiempo para saturar las muestras de suelo no saturado y las condiciones de frontera pueden no ser apropiadas. Además, en la práctica puede representar un problema desarrollar el contacto pleno entre las dos celdas de suelo (Shackelford, 1990) lo cual se puede ver reflejado en una discontinuidad en la

interfaz entre suelos en los perfiles de concentración. Con el fin de reducir el margen de error, Olesen et al., en el año 2000 implementaron una metodología en la que aseguran desarrollar un contacto pleno en la interfaz entre suelos que corrige la discontinuidad (Olesen et al, 2000). Por otra parte, el costo que se requiere para implementar esta metodología es similar a los métodos anteriores (aproximadamente \$ 9.000.000 COP, ver detalle en Apéndice D).

3.3.5 Método de Dialysis-leaching

El método de Dialysis-leaching desarrollado por Sample-Lord y Shackelford en 2016 se basa y combina las metodologías ya existentes de Dynamic-Leaching y de Diálisis, que no están relacionadas con el análisis de la difusión de suelos (Sample-Lord & Shackelford, 2016).

El ensayo Dynamic-leaching es usado para evaluar la difusión de aquellos desechos que han sido sometidos a procesos de estabilización o solidificación (Côté et al, 1987). Los desechos de geometría definida son sumergidos en agua desionizada, solución química o en agua subterránea, se mide la concentración del contaminante que ha sido difundida en la solución durante un intervalo de tiempo definido. Bajo estas condiciones es posible encontrar una solución analítica a la segunda ley de Fick y a su vez determinar el coeficiente de difusión aparente (D_a). Esta metodología ha sido estandarizada por la ANSI/ANS (2008), por el ASTM (2008) y por la U.S. EPA (2013), en donde cada una difiere en la duración del ensayo, los intervalos de medición de difusión y el procedimiento recomendado. El ANSI/ANS tiene una duración de 90 días con 10 intervalos de medición, el ASTM tiene una duración total de 11 días con 13 intervalos de medición y la EPA una duración de 63 días con 9 intervalos de medición. Por otra parte, el ensayo de diálisis es un método que consiste en la remoción del exceso de sales presentes en suelos arcillosos, es usado masivamente por los científicos en la purificación de arcillas. La arcilla es puesta en una

membrana permeable, que permite el paso de solutos como el Na^+ y Cl^- a través de esta, y luego es sumergida en un recipiente de agua desionizada (Sample-Lord & Schakelford, 2016). Se ha observado que es un procedimiento simple, de bajo costo y poca duración (Sample-Lord, 2015).

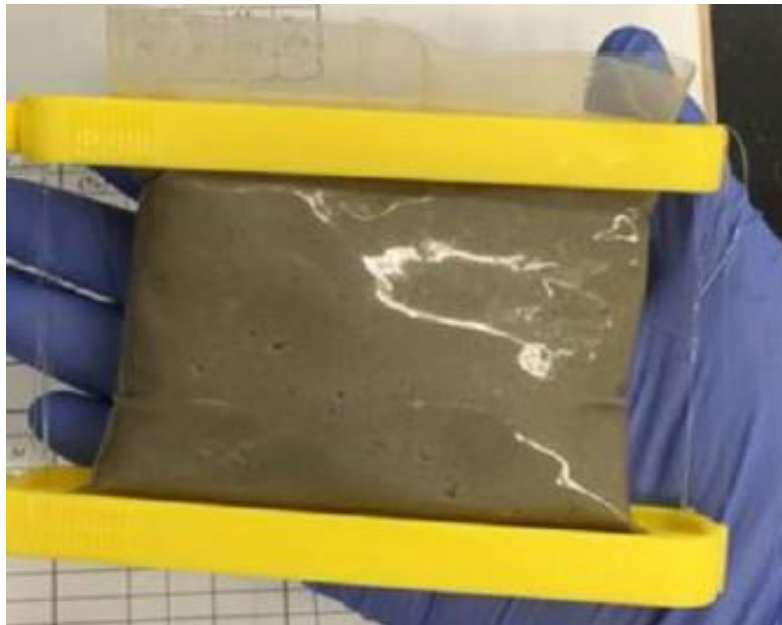
Debido a la inexistencia de un procedimiento estandarizado del método Dynamic-leaching con el uso de diálisis, se desarrolló una metodología basada en la literatura y ensayos de prueba y error para medir el coeficiente de difusión entre suelo arcilloso y solución salina, posteriormente en soluciones monovalentes como KCl dando resultados similares a los obtenidos mediante los métodos tradicionales (Tong et al, 2018).

En estudios anteriores se han utilizado los siguientes materiales y equipo, agua desionizada a 25 °C, una solución salina que puede ser NaCl, CaCl_2 o KCl a 25°, suelo arcilloso de alta plasticidad según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (USCS) (ASTM, 2011) o arcillas arenosas (Sample-Lord et al, 2021) o un compuesto de suelo y polímeros (Sample-Lord et al, 2017), una bolsa de diálisis que permita el transporte de la solución y bloquee el transporte de partículas de suelo, recipiente (su tamaño depende de la relación masa-contaminante difundido que se establezca) y un mezclador magnético.

La metodología que se ha planteado consiste en dos etapas; en la primera se establece la concentración de solución salina presente en el suelo arcilloso. Se determina la sal soluble que hay inicialmente en el suelo con el fin de conocer su aporte a la concentración de solución. Luego, el suelo seco y una cantidad determinada de solución salina son mezcladas y colocadas en la membrana permeable (bolsa de diálisis), esta mezcla tiene apariencia como se muestra en la Figura 9. La correcta preparación del espécimen y la medición de la concentración inicial son factores influyentes en el desarrollo del ensayo, ya que un error en estos puede resultar en una sobreestimación del coeficiente de difusión aparente (Sample-Lord, 2019).

Figura 8.

Suelo saturado con C_o de la solución contaminante

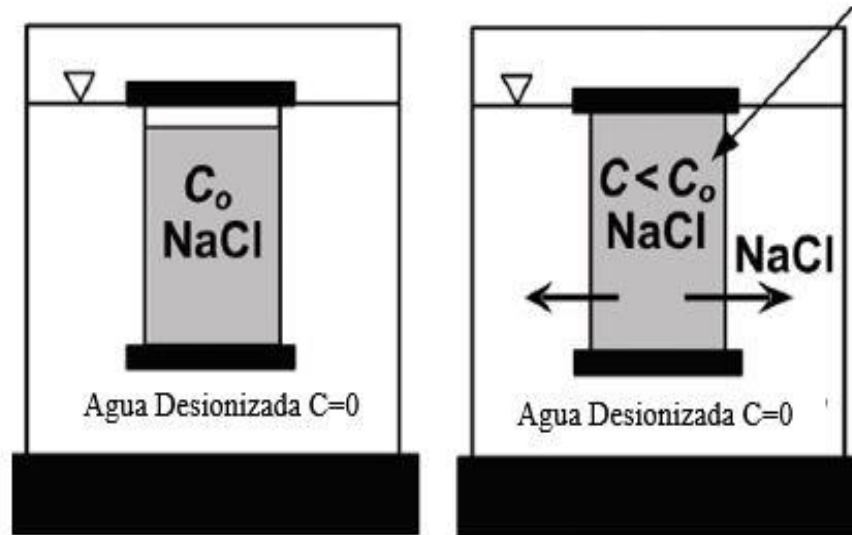


Nota. Foto de una muestra de suelo saturada con la solución contaminante Adaptado de *Dialysis Method to Measure Diffusion in Sodium and Enhanced Bentonites* (p. 14), por Sample-Lord et al, 2019, Geo-Congress.

En la segunda etapa, se realiza el proceso de diálisis, el espécimen es puesto en un recipiente lleno de agua desionizada. A medida que transcurre el tiempo, la solución salina presente en los poros del suelo es transportada a través de la membrana permeable hacia el agua desionizada debido al gradiente de concentración (Figura 10). El agua es reemplazada cada 24 horas durante 11 días, recomendación del ASTM. Al inicio de cada intervalo y al final del ensayo se mide la masa y el volumen del espécimen por medio de desplazamiento de líquido. También es medida la conductividad eléctrica, el pH, la temperatura y la concentración de Cl^- del agua desionizada fresca, es decir la que va a reemplazar, y el agua desionizada que va a ser reemplazada.

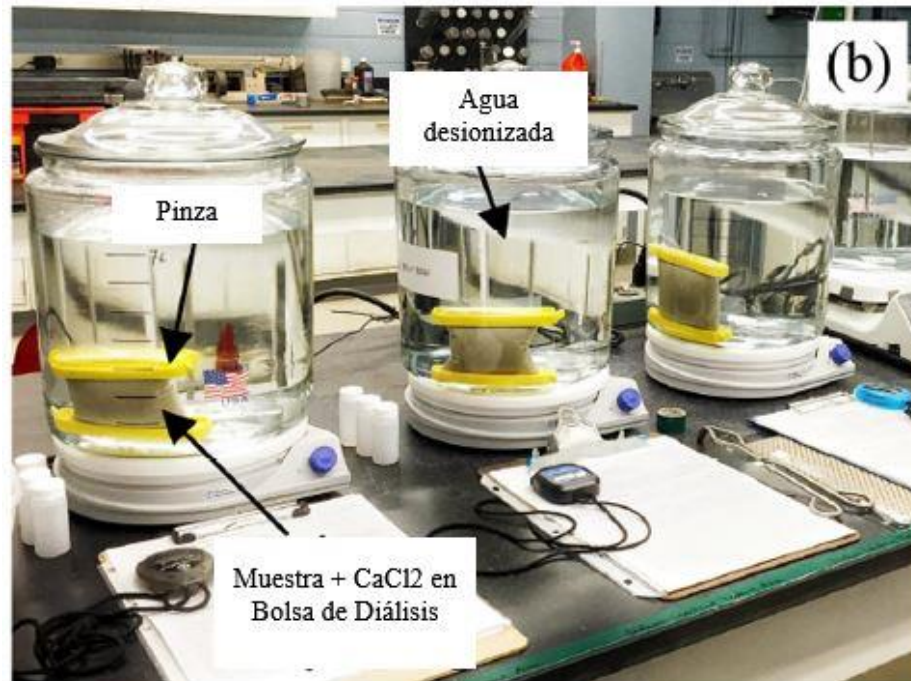
Figura 9.

Representación de la diálisis



Nota. Esquema de la representación del proceso de diálisis Adaptado de *Solute Diffusion in Bentonite Pastes* (p. 04016033-3), por Sample-Lor, 2016, J. Geotech. Geoenviron.

La difusión de las sales solubles desde el suelo hacia el agua desionizada representa un escenario de difusión de masa, y el reemplazo periódico de agua establece una condición de frontera de flujo. Dadas estas condiciones, es posible calcular el coeficiente de difusión aparente D_a a partir de los modelos de difusión de masa existentes que utilizan la segunda ley de Fick.

Figura 10.*Proceso de Diálisis*

Nota. Foto de Montaje de laboratorio proceso de diálisis Adaptado de *Diffusion of Calcium Chloride through Polymerized Bentonite* (p. 203), por Sample-Lord, 2017, Geotechnical Frontiers.

El modelo descrito por la ANSI/ANS asume un medio contaminante finito de forma cilíndrica o un medio semi-infinito basado en la fracción filtrada acumulativa (CFL). La CFL es la razón entre la masa difundida acumulada y la masa inicial en el espécimen, en un intervalo determinado:

$$CFL = \frac{M_t}{M_0} \quad (12)$$

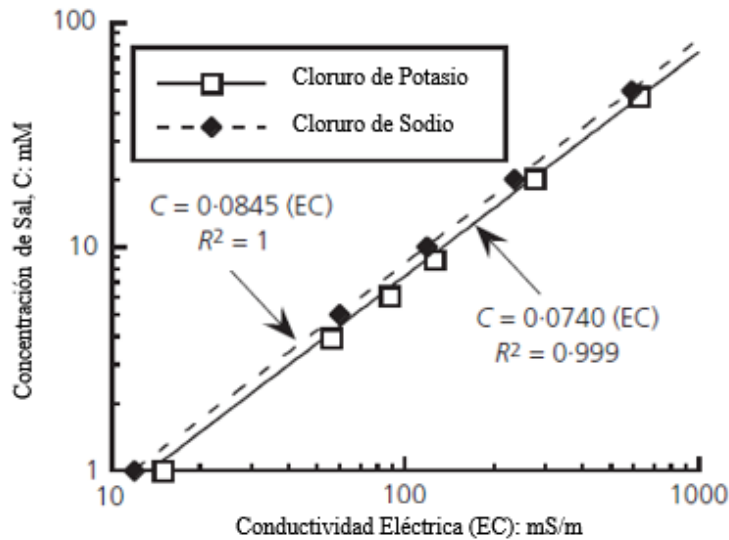
Donde M_t es la masa del contaminante que ha sido difundida desde el suelo a un tiempo t ; y M_0 es la masa del contaminante en el espécimen.

$$M_t = \sum \Delta m = \sum \left[8.45 \times 10^{-5} \frac{\text{mol/L}}{\text{mS/m}} \times \Delta EC (\text{mS/m}) \times V_L \times mw_{NaCl} \right] \quad (13)$$

El valor de M_t es medido antes y después de cada intervalo de tiempo. También es posible determinar la concentración del contaminante presente en el agua desionizada por medio de correlaciones entre EC y la concentración de sales (Malasius et al, 2015).

Figura 11.

Correlación entre EC y concentración de sal



Nota. Gráfica de la Relación entre la conductividad eléctrica medida y la concentración de sal para soluciones de cloruro de potasio y cloruro de sodio a 25°C Tomado de *Restricted salt diffusion in a geosynthetic clay liner* (p. 70), por Malusis et al, 2016, ICE Publishing.

Si $CFL \geq 0.2$, se asume medio cilíndrico finito, y se determina el coeficiente de difusión aparente de la siguiente manera:

$$D_a = \frac{Gd^2}{t} \quad (14)$$

Donde G es un factor de tiempo adimensional que depende de la relación entre la longitud y el diámetro del espécimen (Nestor, 1980) (la tabla con las relaciones para determinar G se encuentra detalladamente en el Apéndice E), d es el diámetro del espécimen en metros y t es el tiempo en segundos de difusión acumulada para un tiempo de interés.

Si $CFL < 0.2$, el coeficiente de difusión aparente se determina a partir de la ecuación de transporte de masa para un medio semi-infinito.

$$D_a = \pi \left[\frac{\Delta m / m_o}{\Delta t} \right] \left[\frac{V}{S} \right]^2 T \quad (15)$$

Donde Δm es el incremento de masa difundida en miligramos durante el intervalo de tiempo, m_o es la masa inicial de soluto en miligramos que hay en el espécimen, V es el volumen del espécimen en metros cúbicos, y S es el área superficial del espécimen en metros cuadrados. El valor de T es el tiempo de difusión promedio de cada intervalo. El valor de T permite determinar el coeficiente de difusión para cada intervalo de tiempo independiente.

$$T = \left[\frac{1}{2} \left(t_n^{\frac{1}{2}} + t_{n-1}^{\frac{1}{2}} \right) \right]^2 \quad (16)$$

En los últimos 5 años se ha divulgado una cantidad considerable de estudios sobre esta metodología, en donde los investigadores buscan mejorar y calibrar el procedimiento ya existente, además de comparar los resultados obtenidos con los de las metodologías tradicionales en la que no se observan diferencias apreciables.

La duración y el costo del ensayo prometen una alternativa más eficiente en la medición del coeficiente de difusión para los suelos respecto a las metodologías mencionadas anteriormente (Sample-Lord, 2019).

3.4. Matriz de decisión

Con base en estudios que se han llevado a cabo en los últimos años y que se recopilan brevemente en este documento, se lleva a cabo un análisis para poder determinar la metodología que se acopla de la mejor manera a las necesidades que hay en este campo de la geotecnia en Colombia. Por lo tanto, se realiza una matriz de decisión (Quiroa, 2021) teniendo en cuenta los factores más relevantes de cada metodología a los que se le valorará numéricamente de 1 a 5, en donde 1 indica la opción menos conveniente y el número 5 la opción más conveniente. Cada factor tendrá un peso correspondiente, lo que permite determinar su importancia en la decisión final. Luego, se multiplica el peso por la valoración de cada factor dando como resultado la valoración final de cada metodología. Bajo este criterio se elige la metodología con el resultado más favorable.

Los factores que se tuvo en cuenta para la matriz son los siguientes: 1) complejidad, 2) duración del ensayo y 3) costo.

La complejidad abarca las complicaciones que pueden surgir en el montaje del equipo, las mediciones de los datos o lo extenso que puede llegar a ser el tratamiento de estos. A este factor se le da un peso de cuatro (4). Otro factor para tener en cuenta es el tiempo que se requiere para realizar los ensayos. Tiene un peso de tres (3). El último factor que se tuvo en cuenta fue el costo de los equipos, materiales, implementos y ensayos complementarios que cada metodología requiere. A este factor se le da un peso de tres (3).

Para obtener la valoración final de cada metodología, se multiplica la valoración que se le dio a cada factor por su peso y se hace una sumatoria dando los siguientes resultados (Tabla 1). Se observa que la metodología dialysis-Leaching es la mejor valorada respecto a los criterios mencionados anteriormente.

Tabla 1.*Valoración de la complejidad en los Métodos*

Metodología	Complejidad (4)	Tiempo (3)	Costo (3)	Valoración Acumulada
Estado Estacionario	1	1	2	13
Time-Lag	2	1	2	17
Columnas	3	4	4	36
Half-Cell	3	3	3	30
Dyalisis-Leaching	4	5	5	46

Nota: Esta tabla muestra la valoración subjetiva de cada uno de los métodos respecto a los factores planteados.

3.5. Procedimiento de Ensayo Dyalisis-Leaching

Los materiales necesarios para desarrollar este ensayo son:

- Agua desionizada.
- Agua potable
- Solución salina con una Co determinada. (NaCl o KCl o CaCl₂).
- Arcillas de media o baja plasticidad (CL) o arenas con adición del 5% de Na-bentonita (los estudios previos se han hecho sobre suelos que tienen entre 4.8% y 7.3% de contenido de bentonita total) (Sample-Lord, 2015).

El equipo requerido es el siguiente:

- Bolsa de diálisis – RC Dialysis membrane tubing 3500 MWCO de 15m.
- Agitador magnético RT Basis Series Magnetic Stirrers.
- Conductivímetro (0.00 a 19.90 Ms/Cm) (Se cotizaron varios conductivímetros. La diferencia entre cada uno son las herramientas adicionales que ofrecen y el grado de precisión, queda en manos del interesado en realizar el ensayo evaluar cuál adquirir de acuerdo con sus necesidades).
- Recipiente de vidrio 4L.

Si se requiere muestreo del suelo, se debe realizar bajo las consideraciones dadas por la norma técnica del INVIAS (2013, A) que se ajuste a las condiciones particulares del proyecto.

Luego, es necesario que se le realicen los siguientes ensayos a la muestra de suelo para determinar el tipo de suelo que se tiene y posteriormente clasificarlo según USCS.

- Determinación de los tamaños de las partículas (INV E-123-13) (INVIAS, 2013, B).
- Determinación del límite líquido (INV E-125-13) (INVIAS, 2013, C).
- Determinación de límite plástico e índice de plasticidad (INV E-126-13) (INVIAS, 2013, D).

Posteriormente, se calcula la porosidad del suelo mediante el uso de relaciones gravimétricas y volumétricas. Para esto, es necesario conocer la gravedad específica de los sólidos que se obtiene del ensayo “Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas del suelo” (INV E-128-13) (INVIAS, 2013, E).

Además, se realiza el ensayo de “Determinación de la capacidad de intercambio catiónico” (ASTM 7503-18) (ASTM, 2010) para conocer la interacción que hay entre las partículas del suelo y del soluto.

Al agua potable, agua desionizada y solución de NaCl se le toman mediciones de pH y conductividad eléctrica para comprobar que las concentraciones de sal presentes sean inexistentes en el caso del agua, y para la solución salina sea la que se determinó desde un principio.

Se determina la cantidad de sales solubles presentes en el suelo (INV E-158-13) (INVIAS, 2013, F), ya que estas contribuyen a la Co de la sal en el ensayo, la no medición de este parámetro repercute drásticamente en el valor obtenido del coeficiente de difusión.

La muestra de suelo es secada en el horno a 110° durante 15 minutos. Después, se añade un volumen de solución salina igual a la cantidad de líquido perdido durante el proceso de secado.

El espécimen es puesto en la bolsa de diálisis semipermeable, posteriormente se coloca en el recipiente de vidrio que contiene 3L de agua desionizada y se ponen sobre el agitador magnético. En este momento, empieza el proceso de difusión debido al gradiente de concentración que se presenta. El agua desionizada se reemplaza después de 2 horas, luego después de 5, después de 17, y luego diariamente durante 10 días (Recomendación ASTM C1308) (ASTM, 2008) para un total de 11 días. En cada intervalo de tiempo se mide la conductividad eléctrica, pH y temperatura del agua desionizada que contiene parte de la solución de NaCl que ha sido difundida desde el suelo.

Las mediciones de concentración de sal se pueden tomar de la siguiente manera:

- Correlaciones de EC y concentraciones de sales.
- Electrodo selectivo de iones (ISE).
- Analizador discreto de nutrientes.

La metodología que se presenta anteriormente se presenta de manera más clara en un mapa conceptual que se encuentra en el Apéndice F.

3.6. Presupuesto

Se realiza la entrega del presupuesto del procedimiento de ensayo dialysis-leaching en pesos colombianos (ver Tabla 2), el cual se obtiene conociendo que equipos y ensayos son necesarios y realizando diversas cotizaciones con el fin de garantizar que los precios expuestos a continuación son los que mejor se adaptan a los ítems de viabilidad y economía planteados para este proyecto.

Tabla 2.*Presupuesto de Laboratorio para el método Dialysis-Leaching*

ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANT	VALOR UNIT.	VALOR PARCIAL
1	Ensayos				
1.1	Muestreo del suelo	UN	1	-	
1.1	Contenido de Sales Solubles (INV E-158-13)	UN	1	\$ 110.000	\$ 110.000
1.2	Determinación de los tamaños de las partículas (INV E-123-13)	UN	1	\$ 207.649	\$ 207.649
1.3	Determinación del límite líquido de los suelos (INV E-125-13)	UN	1	\$ 60.935	\$ 60.935
1.4	Determinación del límite líquido e índice de plasticidad (INV E-126-13)	UN	1	\$ 60.935	\$ 60.935
1.5	Determinación del contenido de agua de muestras de suelo (INV E-122-13)	UN	1	\$ 15.170	\$ 15.170
1.6	Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos (INV E-128-13)	UN	1	\$ 71.741	\$ 71.741
				Subtotal	\$ 526.430
2	Equipo				
2.1	Recipiente de vidrio	UN	1	\$ 40.000	\$ 40.000
2.2	Bolsa de diálisis - RC Dialysis Membrane Tubing 3500 MWCO de 15m	UN	1	\$ 1.926.462	\$ 1.926.462
2.3	Agitador Magnético - RT Basis Series Magnetic Stirrers	UN	1	\$ 982.689	\$ 982.689
2.4	Conductivímetro 0.00 to 19.90 ms/cm	UN	1	\$ 584.200	\$ 584.200
2.5	VSTAR22 - Conductivímetro de mesa Orion marca Thermo Scientific	UN	1	\$ 9.130.000	
2.6	STARA 1125 - kit Orion Conductivímetro de mesa Thermo Scientific	UN	1	\$ 5.805.000	

2.7	STARA 2125 medidor de conductividad de mesa Thermo Scientific Orion	UN	1	\$ 6.710.000	
				Subtotal	\$ 3.533.351
3	Materiales				
3.1	Agua Desionizada x Galón	Galón	13	\$ 18.500	\$ 240.500
3.2	500g de Cloruro de Sodio (NaCl)	UN	1	\$ 900	\$ 900
				Subtotal	\$ 241.400
				Total	\$ 4.301.181

Nota: Esta tabla muestra las cotizaciones de los equipos y materiales para la implementación del método Dialysis-Leaching para el año 2021. El muestreo del suelo varía dependiendo de las condiciones de cada ensayo por lo que el valor difiere en cada uno. Se cotiza una membrana de diálisis de 15m, sin embargo, cada ensayo requiere solo 10cm. Se cotizaron varios conductivímetros. La diferencia entre cada uno son las herramientas adicionales que ofrecen. Para este estudio en específico se toma el de menos valor y queda en manos del interesado en realizar el ensayo evaluar cuál adquirir.

4. Conclusiones

Tradicionalmente el coeficiente de difusión no era calculado, ya que hasta la década de los 90 se consideraba despreciable en el transporte de solutos. Sin embargo, en los estudios que se recopilaban se demuestra que en suelos finos este fenómeno es el proceso que domina por encima de la advección. La determinación de este coeficiente adquiere importancia debido a que es utilizado en los modelos de transporte de contaminantes en los suelos.

Se hizo una recopilación de artículos que explican como medir el coeficiente de difusión; las metodologías que se hallaron son: el estado estacionario, time-lag, columnas, celdas medias y lixiviación por diálisis (dialysis-leaching).

Los principales retos de los métodos tradicionales son el tiempo que requiere el ensayo (duración de 100 a 200 días en el método estacionario), su alto costo (estado estacionario y en

columnas) o la complejidad de realizarlos correctamente (estado estacionario, columnas y celdas medias). Por otra parte, el análisis realizado con la matriz de decisión sugiere que la técnica dialysis-leaching es conveniente debido a la corta duración del ensayo (11 días aproximadamente), el asequible precio y el procedimiento no presenta gran complejidad.

Finalmente, se calculó un presupuesto aproximado de \$ 4.301.181 COP para la futura implementación del método.

5. Recomendaciones

El tipo de suelo no influye en el tiempo que se requiere para determinar el coeficiente de difusión mediante el método dialysis-leaching, ya que el proceso de difusión ocurre principalmente en los dos primeros días del ensayo. Además, se están adelantando investigaciones que sugerirían reducir la duración total del ensayo (Sample-Lord et al., 2021).

Al momento de realizar la adquisición de los equipos e insumos se debe tener en cuenta la disponibilidad en el país dado que la mayoría de los componentes son escasos.

En el procedimiento de dialysis-leaching, la preparación de la muestra de suelo aún está en proceso de calibración. En los estudios más recientes los suelos son remoldeados, esto no parece influir en los resultados obtenidos del coeficiente de difusión (Sample-Lord et al., 2021). Se recomienda estar al tanto de los avances que se hagan en investigaciones futuras.

Referencias Bibliográficas

- ANSI/ANS (American National Standards Institute/American Nuclear Society). (1986). Measurement of the leachability of solidified low-level radioactive wastes by a short-term test procedure. ANSI/ANS-16.1-2003-R2008, New York.
- ASTM, D. (2011). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system). ASTM D2487-11, West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2008). Standard test method for accelerated leach test for diffusive releases from solidified waste and a computer program to model diffusive, fractional leaching from cylindrical waste forms. ASTM C1308.
- ASTM. (2010). Determinación de la capacidad de intercambio catiónico. ASTM D7503-10, West Conshohocken, PA.
- Carslaw., H & Jaeger., J. (1959). Conduction of heat in solids, Oxford, Inglaterra, Oxford University Press.
- Charles, D. (1991). Laboratory diffusion testing for waste disposal—A review. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7(3), 177-217.
- Cote, P., Constable, T., & Moreira, A. (1987). An evaluation of cement-based waste forms using the results of approximately two years of dynamic leaching. *Nuclear and chemical waste management*, 7(2), 129-139.
- Crank, J. (1956). *The mathematics of diffusion*. Oxford university press. 1st edition.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press, Oxford, 2nd ed., pp 414.

- De Soto, I., Ruiz, A., Ayora, C., García, R., Regadio, M., & Cuevas, J. (2012). Diffusion of landfill leachate through compacted natural clays containing small amounts of carbonates and sulfates. *Applied Geochemistry*, 27(6), 1202-1213.
- Freeze, R & Cherry, J. (1979). Upper Saddle River, NJ, Estados Unidos de América: Pearson.
- Husted, R., & Low, P. (1954). Ion diffusion in bentonite. *Soil Science*, 77(5), 343-354.
- Husted, R., & Low, P. (1954). Ion diffusion in bentonite. *Soil Science*, 77(5), 343-354.
- INVIAS. (2013) A. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carretera.
- INVIAS. (2013) B. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. INVIAS E-123.
- INVIAS. (2013) C. Determinación del límite líquido de los suelos. INVIAS E-125.
- INVIAS. (2013) D. Determinación de límite plástico e índice de plasticidad. INVIAS E-126.
- INVIAS. (2013) E. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas del suelo. INVIAS E-128.
- INVIAS. (2013) F. Determinación del contenido de sales solubles presentes en el suelo. INVIAS E-158.
- Jost, W. (1960). Diffusion in Solids, Liquids, and Gases. Academic Press, New York, NY, 558 pp.
- Lenoir, C & Tornari, G. (2004). Contaminación y tratamiento de suelo. *Buenos Aires, Argentina*.
- Malusis, M., Kang, J & Shackelford, C. (2015). Restricted salt diffusion in a geosynthetic clay liner. *Environmental Geotechnics*, 2(2), 68-77. Society of Civil Engineers.
- Malusis, M., Shackelford, C & Olsen, H. (2001). A laboratory apparatus to measure chemico-osmotic efficiency coefficients for clay soils. *Geotechnical Testing Journal*, 24(3), 229-242.
- Martínez, J. (2005). Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. vol. 1.

- Martínez, J., Mallo, M., Lucas, R., Alvarez, J., & Salvarrey, A. (2005). Guía para la gestión integral de residuos peligrosos: Fundamentos.
- Muurinen, A. (1990). Diffusion of uranium in compacted sodium bentonite. *Engineering geology*, 28(3-4), 359-367.
- Nestor Jr, C. (1980). Diffusion from solid cylinders (No. ORNL/CSD/TM-84). Oak Ridge National Lab., TN (USA).
- Olesen, T., Moldrup, P., Yamaguchi, T., Nissen, H., & Rolston, D. (2000). Modified half-cell method for measuring the solute diffusion coefficient in undisturbed, unsaturated soil. *Soil science*, 165(11), 835-840.
- Parlange, J., & Starr, J. (1975). Linear dispersion in finite columns. *Soil Science Society of America Journal*, 39(5), 817-819.
- Quigley, R., Yanful, E., & Fernandez, F. (1987). Ion transfer by diffusion through clayey barriers. In *Geotechnical Practice for Waste Disposal'87* (pp. 137-158). ASCE.
- Quiroga, M. (12 de abril, 2021). Matriz de decisión. *Economipedia*. [Www.Economipedia.com](http://www.Economipedia.com)
- Robin, M., Gillham, R & Oscarson, D. (1987). Diffusion of strontium and chloride in compacted clay-based materials. *Soil Science Society of America Journal*, 51(5), 1102-1108.
- Sample-Lord, K & Shackelford, C. (2016). Solute diffusion in bentonite pastes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(8), 04016033.
- Sample-Lord, K. (2015). Membrane behavior and diffusion in unsaturated sodium bentonite (Doctoral dissertation). Colorado State University.
- Sample-Lord, K., & Shackelford, C. (2016). Dialysis method to control exchangeable sodium and remove excess salts from bentonite. *Geotechnical Testing Journal*, 39(2), 206-216.

- Sample-Lord, K., Ahmed, M & Malusis, M. (2021). Diffusion through soil-bentonite backfill from a constructed vertical cutoff wall. *Soils and Foundations*, 61(2), 429-443.
- Sample-Lord, K., Bohnhoff, G & Tong, S. (2017). Diffusion of calcium chloride through polymerized bentonite. In *Geotechnical Frontiers 2017* (pp. 200-208).
- Sample-Lord, K., Bohnhoff, G & Tong, S. (2017). Diffusion of calcium chloride through polymerized bentonite. In *Geotechnical Frontiers 2017* (pp. 200-208).
- Shackelford, C. D., & Daniel, D. E. (1991). Diffusion in saturated soil. I: Background. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(3), 467-484.
- Shackelford, D., & Moore, S. M. (2013). Fickian diffusion of radionuclides for engineered containment barriers: Diffusion coefficients, porosities, and complicating issues. *Engineering Geology*, 152(1), 133-147.
- Takai, A., Katsumi, T., Inui, T., & Kamon, M. (2017). Solute transport in soil-bentonite cutoff walls considering chemical diffusion. In *Nineteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Tong, S., Sample-Lord, K., Bohnhoff, G., & Balken, A. (2018). Salt diffusion through sodium bentonite and bentonite polymer composite. In *The International Congress on Environmental Geotechnics* (pp. 569-576). Springer, Singapore.
- Tong, S., Sample-Lord, K., Bohnhoff, G., Balken, A & Ahmed, M. (2019). Dialysis method to measure diffusion in sodium and enhanced bentonites. In *Geo-Congress 2019: Geoenvironmental Engineering and Sustainability* (pp. 12-21). Reston, VA: American
- US EPA. (2013). Method 1315: Mass transfer rates of constituents in monolithic or compacted granular materials using a semi-dynamic tank leaching procedure. Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods. Washington, DC.

Zurita, P & Acosta, N. (2016). Modelación del transporte de contaminantes en la masa de suelo.

Apéndices

Apéndice A.

Presupuesto general del método Estacionario

ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANT	PRECIO UNITARIO	VALOR PARCIAL
1.0	Ensayos				
1.1	Muestreo del suelo	UN	1	-	*
1.1	Contenido de Sales Solubles (INV E-158-13)	UN	1	\$ 110.000	\$ 110.000
1.2	Determinación de los tamaños de las partículas (INV E-123-13)	UN	1	\$ 207.649	\$ 207.649
1.3	Determinación del límite líquido de los suelos (INV E-125-13)	UN	1	\$ 60.935	\$ 60.935
1.4	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (INV E-126-13)	UN	1	\$ 60.935	\$ 60.935
1.5	Determinación del contenido de agua de muestras de suelo (INV E-122-13)	UN	1	\$ 15.170	\$ 15.170
1.6	Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos (INV E-128-13)	UN	1	\$ 71.741	\$ 71.741
				Subtotal	\$ 526.430
2.0	Equipo				
2.1	Celda Triaxial 4"	UN	1	\$ 7.612.800	\$ 7.612.800
2.2	Actuador en acero inoxidable	UN	2	\$ 175.500	\$ 351.000
2.3	Bomba de flujo 1.6HP	UN	1	\$ 452.400	\$ 452.400
2.4	Tubería 1/8" acero inoxidable 3m de largo	UN	2	\$ 17.940	\$ 35.880
2.5	Transductor de Presión Diferencial	UN	1	\$ 5.800.000	\$ 5.800.000
2.6	Demodulador	UN	1	\$ 500.000	\$ 500.000
2.7	Acumulador de Vejiga	UN	2	\$ 139.191	\$ 278.382
				Subtotal	\$ 15.030.462
3.0	Materiales				
3.1	Agua Desionizada x Galón	Galón	4	\$ 18.500	\$ 74.000
3.2	50g de Cloruro de Calcio (CaCl ₂)	UN	1	\$ 2.500	\$ 2.500
				Subtotal	\$ 76.500
				Total	\$ 15.633.392

Nota: Elaboración propia

Apéndice B.*Presupuesto general del método Time-Lag*

ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANT	PRECIO UNITARIO	VALOR PARCIAL
1.0	Ensayos				
1.1	Muestreo del suelo	UN	1	-	
1.1	Contenido de Sales Solubles (INV E-158-13)	UN	1	\$ 110.000	\$ 110.000
1.2	Determinación de los tamaños de las partículas (INV E-123-13)	UN	1	\$ 207.649	\$ 207.649
1.3	Determinación del límite líquido de los suelos (INV E-125-13)	UN	1	\$ 60.935	\$ 60.935
1.4	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (INV E-126-13)	UN	1	\$ 60.935	\$ 60.935
1.5	Determinación del contenido de agua de muestras de suelo (INV E-122-13)	UN	1	\$ 15.170	\$ 15.170
1.6	Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos (INV E-128-13)	UN	1	\$ 71.741	\$ 71.741
				Subtotal	\$ 526.430
2.0	Equipo				
2.1	Celda Triaxial 4"	UN	1	\$ 7.612.800	\$ 7.612.800
2.2	Actuador en acero inoxidable	UN	2	\$ 175.500	\$ 351.000
2.3	Bomba de flujo 1.6HP	UN	1	\$ 452.400	\$ 452.400
2.4	Tubería 1/8" acero inoxidable 3m de largo	UN	2	\$ 17.940	\$ 35.880
2.5	Transductor de Presión Diferencial	UN	1	\$ 5.800.000	\$ 5.800.000
2.6	Demodulador	UN	1	\$ 500.000	\$ 500.000
2.7	Acumulador de Vejiga	UN	2	\$ 139.191	\$ 278.382
				Subtotal	\$ 15.030.462
3.0	Materiales				
3.1	Agua Desionizada x Galón	Galón	4	\$ 18.500	\$ 74.000
3.2	50g de Cloruro de Calcio (CaCl ₂)	UN	1	\$ 2.500	\$ 2.500
				Subtotal	\$ 76.500
				Total	\$ 15.633.392

Nota: Elaboración propia

Apéndice C.*Presupuesto general del método de Columnas*

ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CAN T	PRECIO UNITARIO	VALOR PARCIAL
1.0	Ensayos				
1.1	Muestreo del suelo	UN	1	-	
1.1	Contenido de Sales Solubles (INV E-158-13)	UN	1	\$ 110.000	\$ 110.000
1.2	Determinación de los tamaños de las partículas (INV E-123-13)	UN	1	\$ 207.649	\$ 207.649
1.3	Determinación del límite líquido de los suelos (INV E-125-13)	UN	1	\$ 60.935	\$ 60.935
1.4	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (INV E-126-13)	UN	1	\$ 60.935	\$ 60.935
1.5	Determinación del contenido de agua de muestras de suelo (INV E-122-13)	UN	1	\$ 15.170	\$ 15.170
1.6	Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos (INV E-128-13)	UN	1	\$ 71.741	\$ 71.741
				Subtotal	\$ 526.430
2.0	Equipo				
2.1	Piedra Porosa 3.925"x1/4"	UN	2	\$ 46.800	\$ 93.600
2.2	Silicona de laboratorio	UN	1	\$ 75.000	\$ 75.000
2.3	Tubería 10cm diámetro acero inoxidable 3m de largo	UN	1	\$ 25.900	\$ 25.900
2.4	Papel de filtro 15cm diámetro	UN	1	\$ 104.992	\$ 104.992
	Horiba 6560-10C	UN	1	\$ 3.900.000	\$ 3.900.000
2.5	Bomba peristáltica 24V	UN	1	\$ 304.200	\$ 304.200
				Subtotal	\$ 4.503.692
3.0	Materiales				
3.1	Recipiente de vidrio	UN	2	\$ 40.000	\$ 80.000
3.2	Agua Destilada x Galón	Galón	4	\$ 24.900	\$ 99.600
3.3	500g de Cloruro de Sodio (NaCl)	UN	1	\$ 900	\$ 900
				Subtotal	\$ 100.500
				Total	\$ 5.130.622

Nota: Elaboración propia

Apéndice D.*Presupuesto general del método de Celdas Medias*

ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANT	PRECIO UNITARIO	VALOR PARCIAL
1.0	Ensayos				
1.1	Muestreo del suelo	UN	1	-	
1.1	Contenido de Sales Solubles (INV E-158-13)	UN	1	\$ 110.000	\$ 110.000
1.2	Determinación de los tamaños de las partículas (INV E-123-13)	UN	1	\$ 207.649	\$ 207.649
1.3	Determinación del límite líquido de los suelos (INV E-125-13)	UN	1	\$ 60.935	\$ 60.935
1.4	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (INV E-126-13)	UN	1	\$ 60.935	\$ 60.935
1.5	Determinación del contenido de agua de muestras de suelo (INV E-122-13)	UN	1	\$ 15.170	\$ 15.170
1.6	Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos (INV E-128-13)	UN	1	\$ 71.741	\$ 71.741
				Subtotal	\$ 526.430
2.0	Equipo				
2.1	Bolsas de polietileno con cremallera - Retail Supply Co	UN	1	\$ 90.000	\$ 90.000
2.2	Corning™ Centrífuga compacta	UN	1	\$ 8.000.000	\$ 8.000.000
2.3	Tapón de Teflón PTFE	UN	1	\$ 81.400	\$ 81.400
2.4	Tubo de Acero Inoxidable	m	8	\$ 33.000	\$ 264.000
				Subtotal	\$ 8.435.400
3.0	Materiales				
3.1	Agua Desionizada x Galón	Galón	4	\$ 18.500	\$ 74.000
3.2	50g de Cloruro de Calcio (CaCl ₂)	UN	2	\$ 2.500	\$ 5.000
				Subtotal	\$ 79.000
				Total	\$ 9.040.830

Nota: Elaboración propia

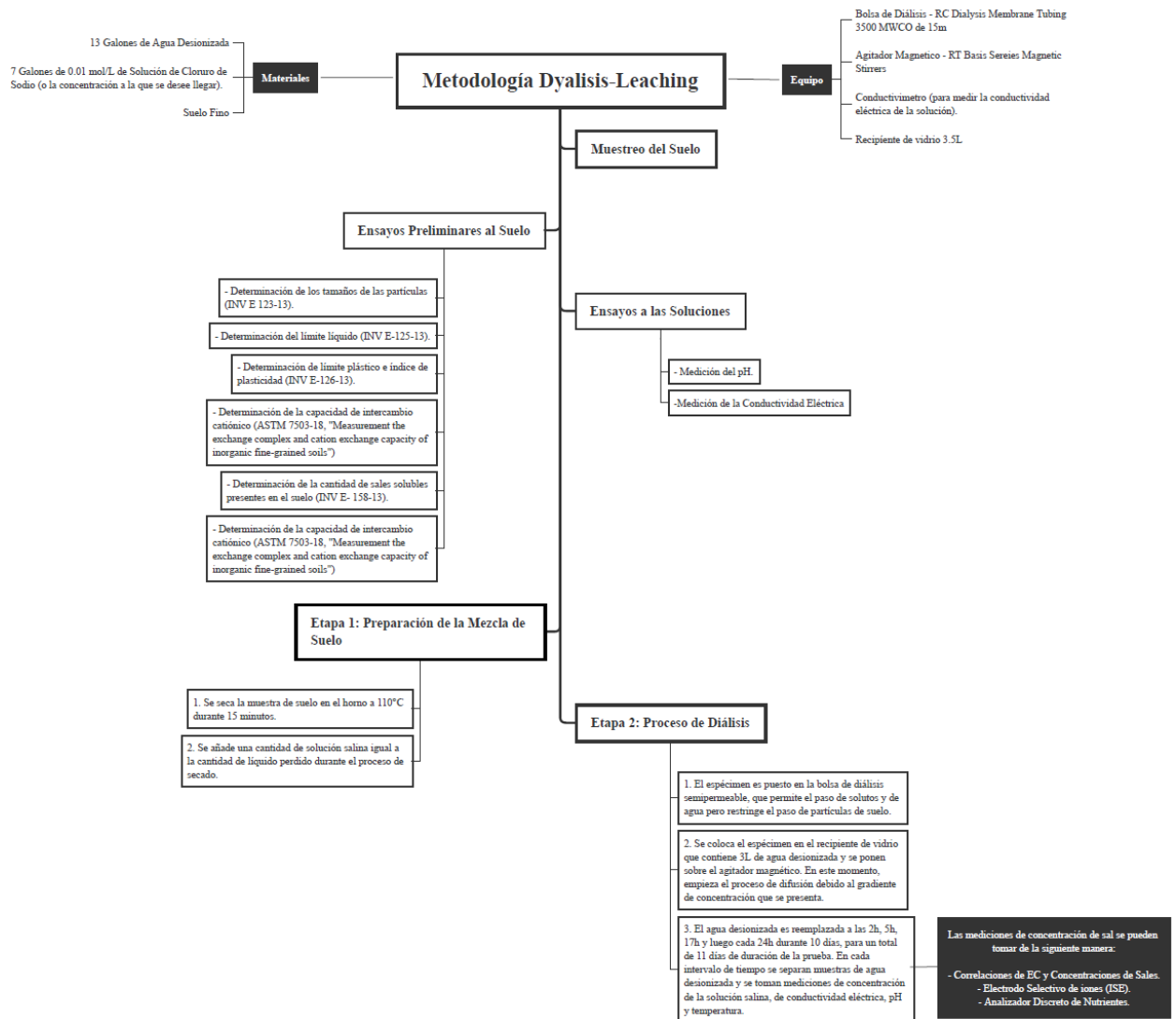
Apéndice E.*Relaciones para determinar el factor adimensional G*

$D_a=t/d$	$l/d=0.3$	$l/d=0.5$	$l/d=1.0$	$l/d=3.0$	$l/d=5.0$
0.0003	0.101408	0.076360	0.575740	0.045045	0.042545
0.001	0.180772	0.136705	0.103534	0.081419	0.076790
0.003	0.301748	0.229279	0.174942	0.138664	0.131416
0.01	0.510551	0.392523	0.303998	0.244982	0.233120
0.02	0.670959	0.522430	0.410497	0.335875	0.320950
0.03	0.771965	0.610018	0.484897	0.401478	0.384795
0.04	0.840159	0.676009	0.542837	0.454011	0.436245
0.05	0.887240	0.728300	0.590358	0.498200	0.479768
0.06	0.920116	0.770865	0.630548	0.536468	0.517652
0.07	0.943235	0.806055	0.665235	0.570251	0.551254
0.08	0.959575	0.835428	0.695608	0.600484	0.581459
0.09	0.971162	0.860099	0.722490	0.627813	0.608878
0.1	0.979401	0.880912	0.746475	0.652708	0.633954
0.12	0.989462	0.913467	0.787452	0.696527	0.678341
0.15	0.996127	0.946170	0.835666	0.750653	0.733647
0.2	0.999266	0.975470	0.891964	0.818792	0.804134
0.25	0.999861	0.988796	0.928648	0.867662	0.855401
0.3	0.999973	0.994879	0.952804	0.903111	0.893055
0.4	0.999999	0.998930	0.979326	0.947847	0.941336
0.5	1	0.999776	0.990941	0.971829	0.967749

Nota: Relaciones para determinar el factor G en el método de Dialysis-Leaching. Adaptado de Nestor, 1980.

Apéndice F.

Diagrama del método Dialysis-Leaching



Nota: El diagrama muestra detalladamente el procedimiento a seguir en el método Dialysis-Leaching.