

# DINÁMICA DE LA VINAZA EN UN SUELO REPRESENTATIVO DEL VALLE DEL CAUCA

Ludwig M. Rojas D. <sup>1</sup>, Hernán Rojas P. <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Palmira Valle.  
(Autor para correspondencia: [lurojas@unisalle.edu.co](mailto:lurojas@unisalle.edu.co)), <sup>2</sup>. Facultad de Ingeniería y  
Administración Universidad Nacional de Colombia. AA 237. Palmira Valle

## RESUMEN

Las altas producciones de alcohol carburante a partir de la caña de azúcar en el departamento del Valle del Cauca en Colombia han generado una continua producción de vinaza la cual es un subproducto de este proceso.

No obstante a los efectos benéficos de la utilización de vinazas como enmiendas y fertilizantes, si no son adecuadamente utilizadas se convierten en un gran agente contaminante del medio ambiente ya que contiene una elevada cantidad de material orgánico biodegradable y no biodegradable.

El trabajo de investigación tiene como objetivo mejorar el conocimiento sobre el movimiento de la vinaza proveniente del proceso agroindustrial de la caña de azúcar en un suelo agrícola no disturbado (Pachic Haplustolls) ubicado a 3° 40.213' N y 76° 17.242' W, a escala de laboratorio. Dadas las características (largos periodos de tiempo y altos costos de investigación) del estudio de transporte de solutos en columnas de suelo en laboratorio no se procedió a realizar un diseño experimental como es corriente en experimentos de agricultura, en este caso los datos son analizados comparando el cuadrado medio del error entre los datos tomados y simulados a través de un modelo seleccionado, así mismo se utilizaron técnicas de regresión y simulación con el fin de explicar la confiabilidad de la estimación de los parámetros de los modelos escogidos.

El experimento consistió en determinar algunas propiedades físicas ( $K_s$ ,  $D_a$ ,  $D_r$ ,  $\theta$  entre otras) los parámetros de las funciones hidráulicas del suelo ( $h(\theta)$  y  $K(\theta)$ ) y los parámetros del transporte para tres horizontes de suelo (FL, FAR y F) y concentraciones de vinaza de 11.49° brix, 1.44° brix y 0.32° brix; con los cuales se simuló un escenario el cual consistió en la aplicación de una carga constante de 20cm por 12 horas para determinar los perfiles de concentración a diferentes tiempos, logrando predecir el movimiento de vinaza en diferentes concentración en el suelo.

**Palabras Claves:** Simulación, Modelo, Vinaza, Transporte de Solutos.

---

## SUMMARY

The high production of fuel alcohol from sugar cane in the department of Valle del Cauca in Colombia has generated a continuous production of "vinasse" which is a byproduct of this process.

Notwithstanding the beneficial effects of the vinasse use as amendments and fertilizers, if it's not properly used it can become a major environmental pollutant because it contains a high amount of biodegradable organic material and not biodegradable.

The research work aims to improve knowledge about the movement of vinasse from the agro-industrial process of agricultural sugar cane on a soil undisturbed (Pachic

Haplustolls) in laboratory, the soil is located at 3 ° 40,213 "N, 76 ° 17,242 ° W. The characteristics (long time periods and high research costs) of the study of solute transport in soil columns in laboratory the study was not proceeded with a common experimental design as in agricultural experiments, in this case, data are analyzed by comparing the mean square error between data obtained and simulated by a selected model and regression and simulation techniques were used in order to explain the reliability of estimating the parameters of the models chosen.

The experiment was to determine some physical properties ( $K_s$ ,  $D_a$ ,  $D_r$ ,  $\theta$  among others) the soil hydraulic functions parameters ( $h(\theta)$  and  $K(\theta)$ ) and transport parameters for three soil horizons (FL FAr and F) and concentrations of vinasse 11.49 ° brix, 1.44 ° brix and 0.32 ° Brix, which was simulated with a stage which consisted of applying a constant load of 20 cm for 12 hours getting to determine the concentration profiles at different times, making possible too predict the movement of vinasse in different concentration in the soil.

**Keywords: Simulation, Model, Vinasse, Solute transport.**

## **INTRODUCCION**

Con la producción de alcohol carburante se tiene un residuo denominado vinaza, el cual es utilizado entre otros, como fuente de nutrientes para los cultivos y como enmienda en suelos degradados por sales (Herrada, 2009; García et al., 2007; Quintero, 2004).

No obstante los efectos benéficos, las vinazas también se constituyen, si no son adecuadamente utilizadas, en un gran agente contaminante del medio ambiente ya que contiene una elevada cantidad de material orgánico biodegradable y no biodegradable.

La investigación logro afianzar conocimientos y comprender la dinámica de las vinazas en el suelo, bajo condiciones saturadas y no saturadas se constituye en una prioridad para la protección del medio ambiente en el Valle del Cauca.

En la presente investigación se presentan los parámetros de flujo y transporte, determinados a nivel de laboratorio y se simula la dinámica de la vinaza como un compuesto no reactivo en su componente de concentración total o sólidos solubles totales para un suelo agrícola no disturbado y cultivado en caña de azúcar en el Valle del Cauca.

## **MATERIALES Y MÉTODOS.**

La investigación se realizó en la Consociación Palmira (PL), Conjunto Palmira localizado en el departamento del Valle del Cauca, Municipio El Cerrito, Ingenio Providencia, Hacienda Providencia, Suerte 002 A, Tablón 5, el cual tiene como coordenadas N 3° 40.213'. W 76°17.242. y una altura de 998.00 m.s.n.m.

Dadas las características (largos periodos de tiempo y altos costos de investigación) del estudio de transporte de solutos en columnas de suelo en laboratorio no se procedió a realizar un diseño experimental como es corriente en experimentos de agricultura, en este caso los datos son analizados comparando el cuadrado medio del error entre los datos tomados y simulados a través de un modelo seleccionado, así mismo se utilizaron técnicas de regresión y simulación con el fin de explicar la confiabilidad de la estimación de los parámetros de los modelos escogidos.

El experimento consistió en determinar algunas propiedades físicas ( $K_s$ ,  $D_a$ ,  $D_r$ ,  $\theta$  entre otras) las funciones hidráulicas del suelo ( $h(\theta)$  y  $K(\theta)$  con sus parámetros) y los parámetros del transporte para tres horizontes de suelo y concentraciones de vinaza de 11.49°brix, 1.44°brix y 0.32°brix

En campo se realizó una calicata de 1.2 m de largo, 1.2m de ancho y 1.5m de profundidad, dejando una área efectiva de 0.8 m por 0.8m para introducir las columnas de 6 pulgadas de diámetro y de 20 cm de profundidad de PVC para extraer las muestras de suelo.

Se realizó la descripción completa del perfil por estrato y se enterraron las respectivas columnas en el suelo dependiendo de la profundidad de cada horizonte entre 20 y 50 cm con el fin de extraer una muestra representativa y homogénea del horizonte en los 10 cm centrales del cilindro, la introducción de los cilindros de PVC se realizó a percusión y tratando de no disturbar o compactar el suelo durante la extracción de la misma.

Posteriormente se realizó la adecuación de las columnas de suelo colocando en la parte inferior una malla fina con el fin de evitar pérdida del mismo, se unificó la altura de las columnas de suelo a diez (10) centímetros debido a que el estrato de menor profundidad era el segundo y tenía 10 cm de profundidad, se adicionó en la parte superior otro cilindro de menor altura con el fin de aplicar y retener una carga de 3 cm, se calibraron recipientes modificados con el principio de Mariotte con el fin de mantener una aplicación constante (carga de 3cm) y se instalaron las columnas y aplicadores, la figura 5 muestra el montaje completo del experimento de desplazamiento miscible el cual se realizó en las instalaciones del laboratorio de física de suelos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

El monitoreo consistió en medir la conductividad eléctrica de los efluentes en función del tiempo con un Multimeter 18.28 marca Eijkelkamp Agriseach Equipment hasta llegar a un valor de conductividad eléctrica constante o igual al de la vinaza aplicada en la entrada de la columna de suelo, se tomó como criterio de selección para los volúmenes de muestras la velocidad de cambio de la conductividad eléctrica en el efluente por lo cual se seleccionaron 50ml inicialmente y cada 100ml luego de las 4 primeras horas con el fin de obtener un amplio rango de datos para la curva de paso del efluente.

Las muestras fueron recogidas en recipientes marcados de 60 ml para posteriormente seleccionar entre 10 y 15 muestras que representaran la curva de efluente para ser analizadas químicamente en el laboratorio.

La determinación de la curva de retención de humedad se realizó ajustando los datos de laboratorio a las funciones de Van Genuchten. (1980)

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^m} \quad \text{Para } h < 0 \text{ y } m = 1 - \frac{1}{n}$$

$$\theta(h) = \theta_s \quad \text{Para } h \geq 0$$

Donde h es la carga hidráulica o potencial,  $\theta, \theta_s, \theta_r$  son los contenidos de humedad del suelo en función de h, a saturación y residual, respectivamente,  $\alpha, n$  y m son parámetros a estimar, que afecta la forma de la curva de retención de humedad.

El término  $\alpha h$  se denomina altura de presión reducida y  $\alpha$  está relacionada con el inverso del valor de entrada del aire o presión de burbujeo. Los parámetros m y n están relacionados según el modelo de conductividad  $m = 1 - \frac{1}{n}$  para el modelo de Mualem (Van Genuchten 1980)

$$K(h) = \frac{\left[1 - (\alpha h)^{n-1} \left\{1 + (\alpha h)^n\right\}^{-m}\right]^2}{\left\{1 + (\alpha h)^n\right\}^{\frac{m}{2}}} \quad \text{para } h < 0$$

$$K(h) = K_s \quad \text{para } h \geq 0$$

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

Para lograr predecir el destino final de una sustancia química se deben tener en cuenta dos factores importantes; las reacciones en las que una sustancia química pueda participar y la velocidad de transporte de dicha sustancia en el medio. La ecuación diferencial que rige el fenómeno es denominada como la ecuación de Advección – Dispersión (EAD) y se basa en el principio de conservación de la masa y en la ley de Ficks :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C + \rho S) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D \frac{\partial C}{\partial x} - qC \right) - \alpha \theta C - \rho \beta S + \gamma \theta$$

Donde;

C: c(x,t) es la concentración de la sustancia químicas en la fase líquida.

S: S(x,t) es la concentración de la sustancia química en la fase sólida.

D: D(x,t) es el coeficiente de dispersión hidrodinámica.

$\theta$ :  $\theta(x,t)$  es el contenido de humedad volumétrico a

q: q(x,t) es el flujo de agua.

$\rho$ :  $\rho(x,t)$  es la densidad de la muestra de suelo.

\*  $\alpha$ :  $\alpha(x)$  es la tasa constante de degradación de primer orden en la fase líquida.

\*  $\beta$ :  $\beta(x)$  es la tasa constante de degradación n de primer orden en la fase Sólida.

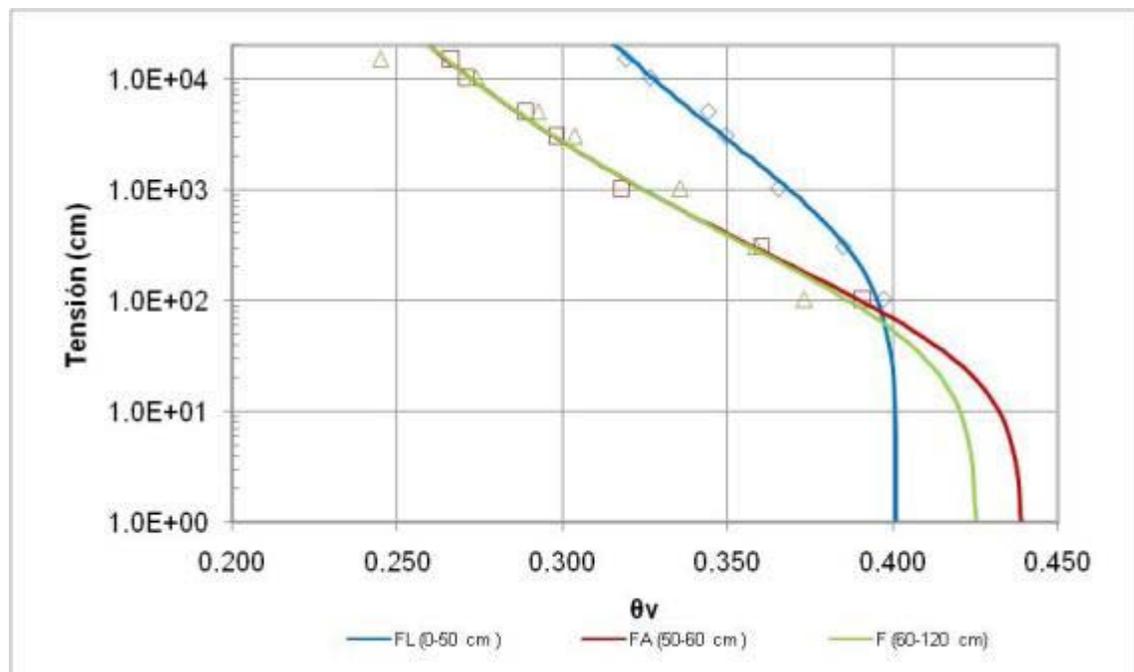
\*  $\gamma$ :  $\gamma(x)$  es la tasa de producción de orden cero..

Fuente: Manual del Chemflo 2000, Nofziger, D.L. and Wu, Jinqun, 2000.

Con el fin de obtener los perfiles de concentración de vinaza en el suelo se utilizó la herramienta computacional CHEMFLOW 2000 la cual reúne las siguientes características: distribución libre, facilidad de manejo, pocos parámetros requiere para evaluar el químico, brinda facilidad al usuario para definir las condiciones iniciales y límites del suelo y de la sustancia que se esté analizando: permite además observar los resultados de forma gráfica y tabulares. A diferencia de los otros modelos, el CHEMFLO considera la ecuación de Richards la cual permite evaluar el movimiento del agua en el suelo y la ecuación de Advección-Dispersión, que estudia el transporte de sustancias químicas en el mismo, permitiendo así comparar el comportamiento de estos fenómenos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros y los respectivos modelos de las propiedades hidráulicas  $\theta(h)$ ,  $K(\theta)$  y  $K(h)$  de los tres horizontes (suelos) del sitio de estudio fueron utilizados para representar gráficamente la curva de retención de humedad del suelo, teniendo en cuenta que los parámetros encontrados son aplicables únicamente a las texturas específicas estudiadas con sus propiedades físicas.



### **Figura1. Curvas de retención de humedad para un Pachic Haplustolls.**

La figura 8 muestra que las curvas de retención de humedad para los horizontes B y C (Franco Arenoso y franco) presentan una retención de humedad inferior al horizonte A (franco limoso) lo cual es debido a que este horizonte presenta un mayor porcentaje de arcillas y limos, los horizontes B y C tiene un comportamiento muy similar debido a que únicamente difieren en las fracciones finas en un máximo de 1% en cada una. El horizonte B presenta un mayor movimiento de agua en el suelo y el horizonte A el menor para el rango de tensiones bajas.

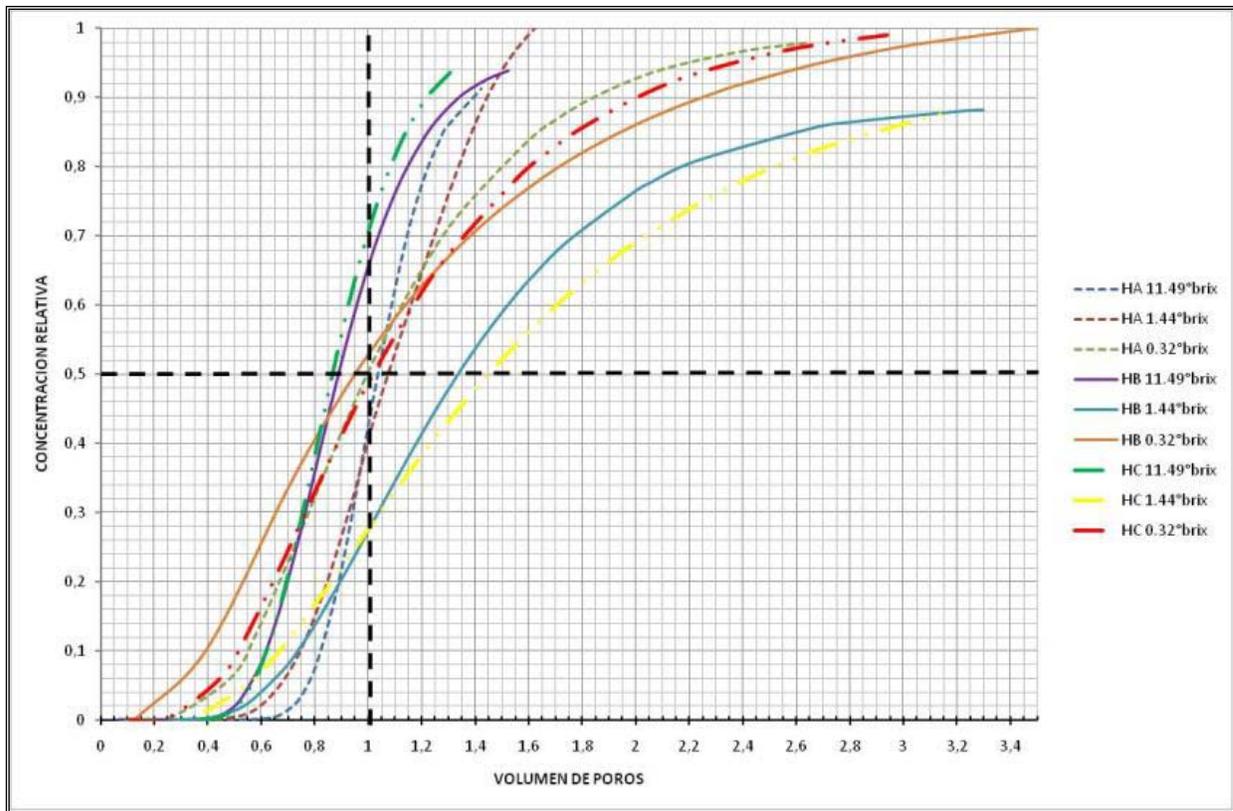
El horizonte A presenta mayor capacidad de retención de agua debido a la asociación de varios factores como son: una considerable cantidad de materia orgánica la cual absorbe y retiene humedad, presenta entre limos y arcillas un valor superior al 60% de la fracción de suelo y tiene una conductividad hidráulica saturada moderadamente baja.

El horizonte B y C presentan características similares en textura, densidad aparente, real y curva de retención de humedad diferenciándose por el valor de conductividad hidráulica saturada ya que el horizonte C dobla el valor de conductividad hidráulica saturada al Horizonte B.

Bajo condiciones de altas tensiones el horizonte A mantiene su característica de mayor retenedor de humedad seguido por el horizonte B y muy cercano a el horizonte C lo cual tiene la misma tendencia que los valores de Materia orgánica e Inversamente a los valores de conductividad hidráulica saturada.

Los parámetros del transporte se determinaron a partir de las curvas de avance o ruptura encontrados en el laboratorio y ajustados, teniendo en cuenta que se desprecia la difusión por las características del experimento.

Las curvas de efluente para los tres tratamientos en los tres horizontes se presentan en la figura 2.



**Figura 2. Curvas de paso, Ruptura o efluente para un Pachic Haplustolls**

Los respectivos parámetros del transporte obtenidos del ajuste de las curvas de ruptura son presentados en la tabla 1

	Tratamiento	Coefficiente de Retardo ( R )	Velocidad de flujo en los Poro (cm/hr)	Dispersión Hidrodinámica (cm <sup>2</sup> /hr)	Dispersividad (cm)	Numero de pecllet	r <sup>2</sup>
<b>Horizonte A</b>	11,49 °Brix	1.037	0.047	0.007	0.151	66.392	0.989
	1,44 °Brix	1.172	0.149	0.070	0.470	21.293	0.991
	0,32 °Brix	1.114	0.199	0.240	1.206	8.289	0.985
<b>Horizonte B</b>	11,49 °Brix	0.910	0.058	0.023	0.396	25.281	0.993
	1,44 °Brix	1.377	0.222	0.229	1.033	9.685	0.963
	0,32 °Brix	1.316	0.717	2.409	3.361	2.975	0.987
<b>Horizonte C</b>	11,49 °Brix	0.896	0.057	0.020	0.349	28.680	0.989
	1,44 °Brix	1.707	0.373	0.788	2.111	4.737	0.992
	0,32 °Brix	1.204	0.182	0.310	1.705	5.867	0.983

**Tabla 1. Parametros del transporte para un Pachic Haplustolls**

El horizonte Franco Limoso se presenta con todas las diluciones una alta movilidad del soluto sin reacción entresuelo-soluto, con la advección como mecanismo dominante y existiendo difusión molecular en pero predomina mayormente la dispersión mecánica. En el Horizonte Franco Arenoso con la aplicación de vinaza a una concentración de 11.49°Brix se presenta una reducción en el volumen de poros con exclusión de aniones donde el mecanismo que domina es la advección existiendo difusión molecular pero predominando mayormente la dispersión mecánica. Con la aplicación de vinaza de 1.44 °Brix se presenta una interacción entre el soluto y el suelo conocida como adsorción del soluto donde el mecanismo que domina en la advección existiendo difusión molecular pero predominando mayormente la dispersión mecánica, finalmente

con la aplicación más diluida de 0.32°Brix se presenta la misma interacción que la vinaza de 1.44°Brix pero se diferencia por la existencia de difusión molecular y dispersión mecánica en igual proporción.

En el Horizonte Franco al aplicar vinaza con una concentración de 11.49°Brix se presenta una reducción en el volumen de poros con exclusión de aniones y el mecanismo que domina es la advección existiendo difusión molecular pero predominando mayormente la dispersión mecánica, durante la aplicación de 1.44°Brix y 0.32°Brix se presenta una interacción entre el soluto y el suelo conocida como adsorción del soluto y el mecanismo que domina es la advección pero diferenciándolos en que durante la aplicación de 1.44°Brix existe difusión molecular y dispersión mecánica en igual proporción, mientras que en la aplicación con vinaza a 0.32°Brix existe difusión molecular pero predomina mayormente la dispersión mecánica.

Con el fin de determinar el avance de la vinaza en el suelo, se toma como escenario una aplicación de una lamina de 20 cm de vinaza (en tres concentraciones diferentes 0.32°Brix , 1.42°Brix y 11.44°Brix.) durante 12 horas y luego redistribución del soluto y de agua en el perfil del suelo. Para las tres simulaciones se tienen en cuenta todos los parámetros físicos, de flujo de agua y soluto del perfil (Cada uno de los tres horizontes) adicionalmente que no existen barreras al final del mismo es decir drenaje libre, se presenta un contenido de humedad uniforme correspondiente a  $0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  , el perfil no presenta concentraciones de soluto en su estado inicial y se presenta flujo convectivo únicamente. En cada simulación se varió la dispersividad dependiendo de la concentración con que se trabajó.

En las graficas 3, 4 y 5 se presentan los respectivos perfiles de concentración de vinaza de un Pachic Haplustolls.

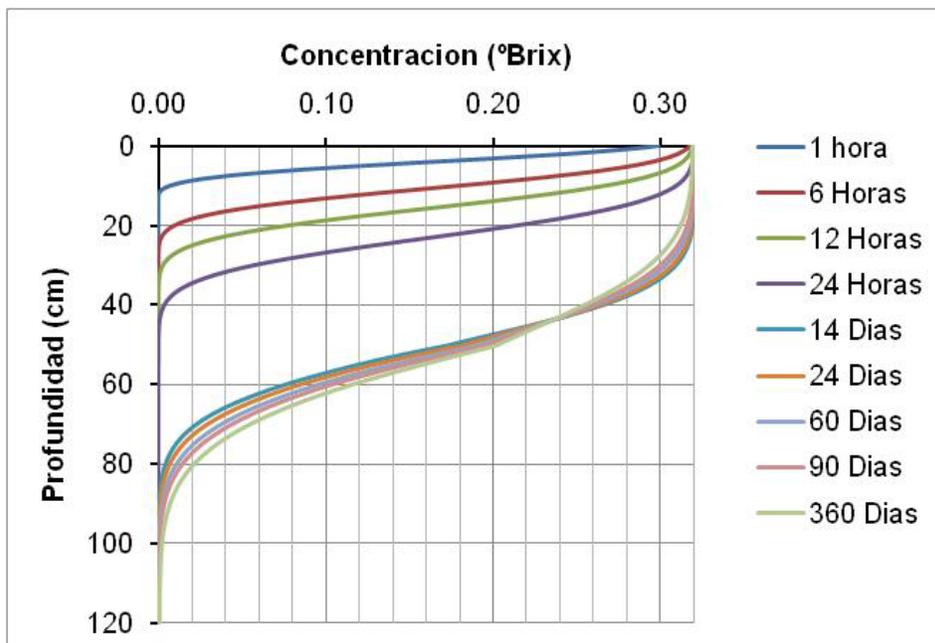


Figura 3. Perfiles de concentración de vinaza a 0.32°Brix para diferentes tiempos.

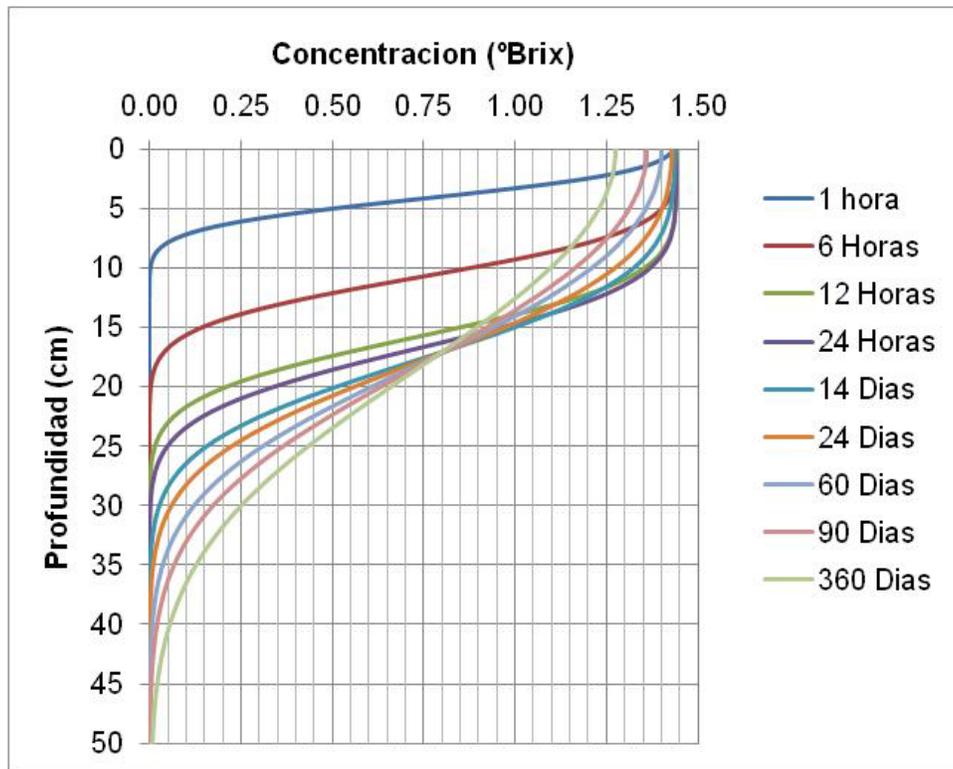


Figura 4. Perfiles de concentración de vinaza a 1.42°Brix para diferentes tiempos.

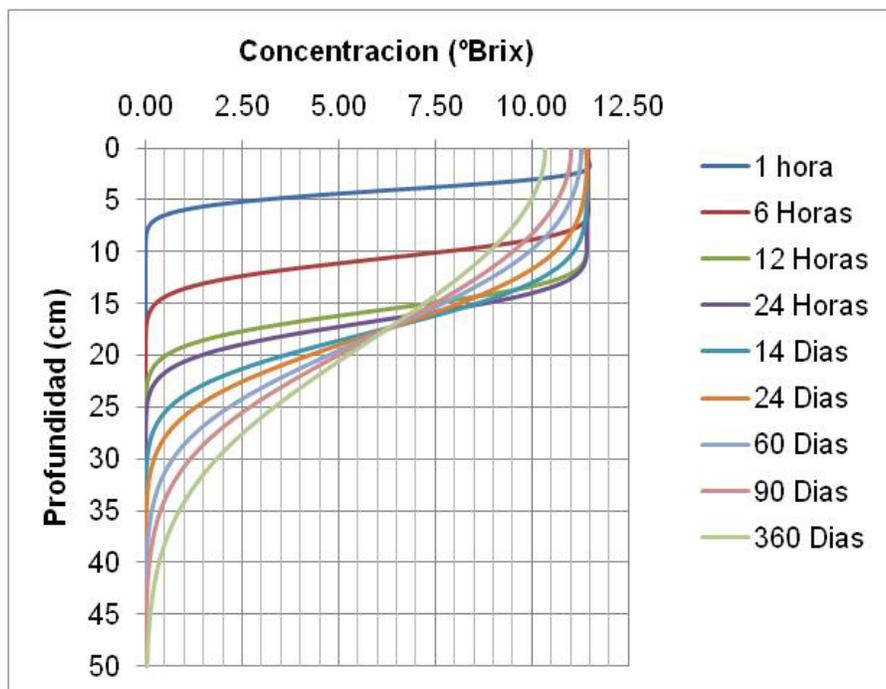


Figura 5. Perfiles de concentración de vinaza a 11.44°Brix para diferentes tiempos.

La figura 3 muestra los perfiles de concentración de vinaza a 0.32°Brix en todo el suelo, donde se evidencia un avance continuo durante la aplicación constante de la lamina de 20cm, en el momento en que se retira la lamina y comienza el proceso de redistribución se disminuye drásticamente la velocidad hasta los 14 días en donde prácticamente se detiene (su avance es mínimo) llegando hasta un máximo de aproximadamente 30 cm con su concentración inicial y logrando alcanzar una profundidad de 100 cm con concentraciones casi nulas en 360 días.

Con los perfiles de concentración de vinaza a 1.42 °Brix y 11.44°Brix (figuras 4 y 5 ) se presenta el mismo fenómeno durante el tiempo de aplicación, al ser retirada la lamina y comenzar el proceso de redistribución el avance es mínimo logrando alcanzar una profundidad de 12 cm con una concentración de 11.42°Brix en 24 horas y un valor máximo de 50 cm en 360 días con concentraciones muy bajas.

## Conclusiones

- ✓ Se lograron obtener los parámetros de las funciones hidráulicas del suelo con sus parámetros  $\alpha$ ,  $n$  y  $K_s$  para cada uno de los 3 horizontes (Franco limoso, Franco Arenoso y Franco) estudiados, obteniendo un  $r^2$  superior al 0.98 luego de ser ajustados al modelo de Van Genuchten y Mualem a través de la aplicación RECT.
- ✓ Se obtuvieron y ajustaron las curvas de paso del efluentes para los parámetros del transporte en cada uno de los horizontes del perfil de suelo en estudio, presentando tendencias iguales en los horizontes Franco arenoso y franco , Los valores de la dispersividad en los tres horizontes presenta un incremento a medida que se disminuye el valor de la concentración de vinaza de 11.49°bix a 1.44°brix.
- ✓ Se obtuvieron los perfiles de concentración de vinaza para un escenarios con la aplicación de diferentes concentraciones de vinaza, logrando predecir el movimiento de la misma en el espacio y tiempo bajo condiciones numéricas-experimentales.
- ✓ El movimiento de vinaza en el suelo estudiado depende básicamente de las propiedades físicas e hidrodinámicas del suelo dando mayor peso a la textura, conductividad hidráulica saturada y del parámetro  $\alpha$ .

## Bibliografía

- DARCY, H. 1856. Dètermination des lois d'écoulement de l'eau à travers le sable. p. 590–594. In Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Victor Dalmont, Paris.
- DIRKSEN, CH. 1999. Soil physics measurements. Catena Verlag. Reiskirchen. Germany. 154 p.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L. Y SAXTON, K. E. 1982. Estimating Soil Water Properties. Transactions, ASAE, 25(5), pp. 1316-1328. U.S.A.

STEED M. 1992. Stella a simulation construction kit: cognitive process and Educational implications. Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching, Vo. 11 No 1 Págs 39-52)

TORIDE, N., F.J. LEIJ, AND M.TH. VAN GENUCHTEN. 1995. The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments, Version 2.1. Research report No.137, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.

VAN GENUCHTEN, M. TH 1980. A Closed- form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, pp. 892-898. U.S.A.

VAN GENUCHTEN, M. Th., AND WIERENGA P.J. 1976. Mass transfer studies in sorbing porous media: I. Analytical solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 40:473-480.

WAGENET, R.J., & RAO, P.S.C. 1990. Modeling pesticide fate in soils. Chapter 10 : 351-398. In : Pesticides in the soil Environment : Processes, Impacts, and Modeling. Ed. Cheng, H.H. SSSA Bopk Ser. 2. SSSA Inc. Madison, WI, 530p.