

Evaluación del desarrollo de un microsistema de macrófitas flotantes a escala de laboratorio

Evaluation of the development of a microsystem of floating macrophytes to laboratory scale

Julio Villegas¹, Allison Lozano¹, Víctor Cortazar¹, Daniela Ramírez¹, Víctor Nagakane¹ & Erick Vallester^{2*}

¹Licenciatura en Ingeniería Ambiental – Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Tecnológica de Panamá,

²Profesor Asesor – Licenciatura en Ingeniería Civil – Facultad de Ingeniería Civil

- Universidad Tecnológica de Panamá

70

Resumen El proyecto consiste en el estudio de humedales flotantes compuestos por macrófitas; que tiene como objetivo de lograr condiciones óptimas para el desarrollo de la flora en un ambiente controlado. Estos sistemas -a gran escala- ayudan a reducir los nitratos en el agua. Los mecanismos involucrados son oxidación bacteriana, filtración, sedimentación y precipitación química. El sistema posee un tiempo de retención de aproximadamente 20 horas, y se analizan los cambios que se generan en el agua al hacer el recorrido a lo largo del humedal. La principal ventaja de estos sistemas de macrófitas flotantes es la gran superficie de contacto que tienen sus raíces con el agua residual ya que esta las baña por completo, lo que permite una gran actividad depuradora de la materia orgánica por medio de los microorganismos adheridos a dicha superficie o por las propias raíces.

Palabras claves macrófitas, nitratos, humedal, oxidación.

Abstract This project consists of the study of floating wetlands composed with macrophytes; which aims to achieve optimal conditions for the development of flora in a controlled environment. These systems - on a large scale - help to reduce nitrates in the water. The mechanisms involved are bacterial oxidation, filtration, sedimentation and chemical precipitation. The entire system has a retention time of approximately 20 hours, and it analyzes the changes that are generated in the water when making the route along the wetland. The main advantage of these systems of floating macrophytes is the large surface of contact that their roots have with the residual water since these bathes them completely, which allows a great purifying activity of the organic matter by the microorganisms adhered to said surface or by the roots themselves.

Keywords macrophytes, nitrate, wetland, oxidation.

* Corresponding author: erick.vallester@utp.ac.pa

1. Introducción

Con el pasar de los años la población a nivel mundial ha aumentado significativamente. Este aumento en la dinámica poblacional trae consigo revolucionarios cambios relacionados con las técnicas de tratamiento de aguas residuales [1].

La nueva generación de ingenieros, que incluye ramas como la ingeniería civil, ambiental y sanitaria, tiene como reto establecer normas, desarrollar tecnologías y aplicar técnicas adecuadas para lidiar con los problemas generados por las aguas negras de origen antropogénicas [2].

Para este fin en particular presentaremos los resultados obtenidos, en un período de 3 meses, en macrófitas flotantes a nivel de escala piloto, que fueron alimentadas a base de agua sintética (composición: nitrato a una concentración de 140 mg/L); los resultados que arroja este estudio probarán si es posible desarrollar dicha tecnología y qué escala es adecuada para su implementación.

Las macrófitas, que no son más que plantas adecuadas para vivir y desarrollarse en sistemas acuáticos, fueron escogidas por su capacidad de procesar nutrientes en un ambiente controlado [3-5].

Consideraremos el hecho de que en los sistemas acuáticos existen organismos a nivel microbiano y parasitario; los huéspedes encontrados se estudiaron para establecer si eran beneficiarios o dañinos para el desarrollo del sistema de macrófitas flotantes [6-7].

2. Metodología y materiales

El parámetro determinante en el diseño y operación de estos sistemas es la carga orgánica, y la misma se ve influenciada por las dimensiones y caudales del sistema (ver figura 1).

Para la construcción del estanque se utilizó:

- Tanque acrílico de 0.5 cm de espesor
- Grifo de entrada del caudal
- Grifo de salida del caudal
- Foco de luz fluorescente

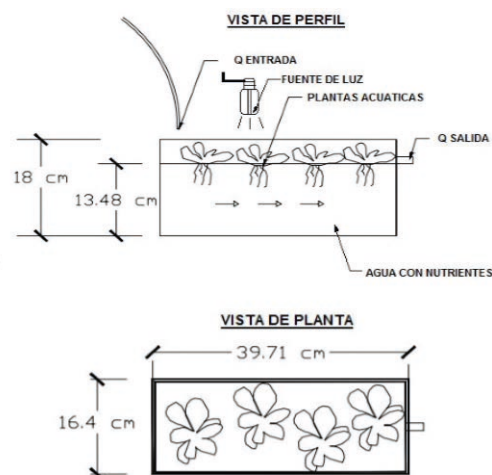


Figura 1. Diseño del sistema utilizado y sus dimensiones.

El sistema de humedal con macrófitas flotantes, estuvo ubicado en el Laboratorio de Fluidos e Hidráulica de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), donde se realizaron los ensayos para observar el desarrollo de las macrófitas flotantes.

El agua sintética utilizada fue preparada con nitrato de potasio (KNO_3) con concentración de 140 mg/L como fuente nutriente, bisulfito de sodio ($NaHSO_3$) el cual reduce el oxígeno disuelto y difosfato de potasio (K_2HPO_4) como controlador de pH.

El caudal que supe de agua al sistema varió entre 10 a 20 ml/min y fue dependiente del comportamiento de la barrera activa, la cual opera como parte del sistema, pero el cual no fue considerado en el siguiente estudio. El tanque posee una capacidad de 8.4 litros.

El humedal flotante presenta dos puntos de toma de muestra: efluente y afluente; la frecuencia de muestreo fue de dos veces por semana. La recolección de la muestra tardaba aproximadamente una hora hasta completar un volumen cercano a 400 ml.

Las plantas fueron sembradas en el sistema experimental en el mes de agosto de 2016. Con el fin de que las plantas crecieran, se adaptaron al medio y a las condiciones de trabajo, se propuso un período de adaptación de 6 días, después de pasado este período se iniciaron las

mediciones de las condiciones que permitieran su desarrollo.

Las condiciones del sistema fueron analizadas principalmente en base a resultados obtenidos en:

Análisis físicos: pH, temperatura, conductividad, salinidad, sólidos disueltos totales, sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos volátiles (SSV) y potencial de óxido-reducción.

Análisis químicos: demanda química de oxígeno (DQO).

Análisis bacteriológicos: tinción de Gram e identificación de organismos.

Análisis bioquímico: demanda biológica de oxígeno (DBO₅).

Estos análisis se realizaron conforme a los procedimientos del *Standard Methods for the examination of Water and Wastewater*. El equipo utilizado para el análisis de la demanda química de oxígeno fue el *Portable Dataloging Spectrophotometer HACH DR/2000*.

Para los otros parámetros analizados como pH, conductividad eléctrica, Sólidos Disueltos Totales, salinidad, oxígeno disuelto, temperatura y nitratos se utilizó el multiparámetro Pro DSS *Digital Professional Series* YSI.

3. Resultados y discusión

Las especies utilizadas en el humedal presentan los rangos de remoción presentados a continuación:

Los sistemas de humedales flotantes se caracterizan por ser, en general, anaerobios. El intercambio de gases que el agua presenta con la atmósfera es reducido por la presencia de las plantas, al igual que la luz, reduciendo la proliferación de algas.

Tabla 1. Especies seleccionadas y sus porcentajes de remoción (Martelo, 2012)

Especie	% DBO	% DQO	% SS
<i>Pistia stratiotes</i>	57-91,9	70,7-93,47	80,6
<i>Lemna minor</i>	94,4		

Este tipo de sistemas consiste en grandes lagunas con bajos niveles de agua, provistas de plantas que flotan libremente en la superficie.

El concepto de tratamiento se basa principalmente en la recolección de la biomasa producida. Si bien la principal función de este tipo de sistemas es la remoción de nutrientes en sistemas de aguas residuales, la eficiencia del mismo depende del área de contacto entre las raíces de las plantas y el agua de la laguna, régimen de cosecha, temperatura y calidad de agua.

Dado que trabajamos con espacio limitado, el área superficial es mínima y la remoción de nitratos no fue apreciable. De igual manera, el acceso a luz solar de igual forma fue limitado, consistiendo de períodos de 6 horas de luz y 6 horas de descanso provistas por la lámpara de luz fluorescente instalada.

Luego de pruebas y ensayos, la especie que mostró mejor adaptabilidad y resistencia a las condiciones fue *Pistia stratiotes*.

La primera prueba con esta planta se realizó utilizando especímenes completamente desarrollados. Sin embargo, por limitaciones de equipamiento de una fuente lumínica y el alimento que las mismas requerían, la mayoría marchitaron en un período de 2 semanas. La segunda siembra se realizó utilizando la misma especie, pero menos desarrolladas.

De esta manera se resolvió la competencia por el alimento, ya que el caudal que fue provisto para el sistema era pobre en nutrientes producto por los procesos de lodos activados y barrera activa realizados antes de proveer al humedal.

3.1 Carga hidráulica

La carga hidráulica es el volumen de agua a tratar por metro cuadrado de superficie y por unidad de tiempo, como se presenta en la ecuación a continuación:

$$CH = \frac{Q}{A} \tag{1}$$

En donde:

CH = Carga horaria

Q = Caudal

A = Área

Dada la variabilidad del afluente, se estimó un promedio de caudal de 8 a 22 ml/min. Con las dimensiones del sistema podemos calcular un área superficial de 0.0651 m², por lo cual podemos estimar una carga hidráulica de:

$$0.1769\text{m}^3/\text{m}^2.\text{día} < \text{CH} < 0.4866\text{m}^3/\text{m}^2.\text{día}$$

3.2 Tiempo de retención

Al igual que la carga hidráulica, el tiempo de retención está ligado a los caudales utilizados. Por su definición, es el tiempo en el que un líquido permanece en un recipiente.

$$T = \frac{V}{Q} \tag{2}$$

En donde:

T = Tiempo

Q = Caudal

V = Velocidad

Siendo que el caudal variaba entre 8 ml/min y 22 ml/min, se utilizó un promedio de 15ml/min se obtuvo un tiempo de retención aproximado de 564.47 minutos, ó 9.47 horas.

3.3 Demanda biológica de oxígeno

La DBO₅ es un parámetro que permite medir la cantidad de oxígeno que los microorganismos (específicamente bacterias, hongos y plancton) consumen para la degradación de la materia orgánica contenida en la muestra, en un período de cinco (5) días.

Los resultados de DBO del caudal del afluente no muestran un comportamiento definido, específicamente en la tercera semana de realización de estas pruebas. Ver tabla 2 y figura 2.

Sin embargo, el comportamiento del DBO del efluente sugiere una reducción de materia

orgánica en el sistema. Como se mencionó con anterioridad, *Pistia estratiotes* tiene un rango de remoción de entre 57 y 90%; suponiendo que en la 3ra semana el valor de DBO es despreciable y se adopta una DBO constante de aproximadamente 20 mg/L, podemos establecer una remoción de materia orgánica en el sistema

Tabla 2. Resultados de DBO en 4 semanas de ensayos para un caudal de 21.6 l/día tanto en el afluente como en el efluente

Nº	DBO afluente (mg/L)	Masa (g/día)	DBO afluente (mg/L)	Masa a (g/día)	% Remoción
1	8	0.1728	6	0.1296	25
2	19.5	0.4212	3.3	0.0713	83
3	6.4	0.1382	5.4	0.1166	16
4	22	0.4752	2	0.0432	91

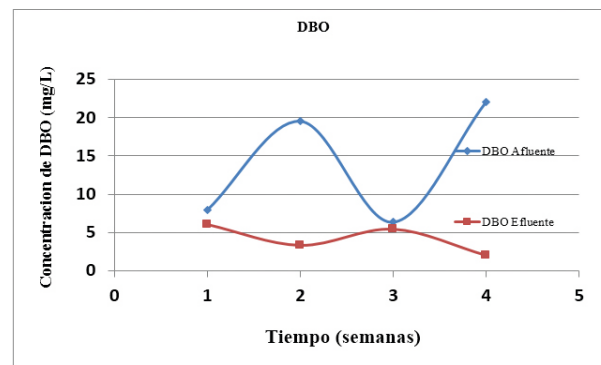


Figura 2. Comportamiento del DBO con respecto al tiempo.

de 80%.

3.4 Carga orgánica

Se obtiene a partir del caudal responde a la concentración de DBO en las aguas residuales.

Se establecieron promedios de DBO de efluente y afluente de 13.975 mg/L y 4.175 mg/L respectivamente, para la estimación de la carga orgánica dentro del rango de caudales establecidos; se pudo, entonces calcular carga orgánica para caudales mínimos:

$$48.096 \text{ mg/día} < \text{CO} < 160.992 \text{ mg/día}$$

O caudales máximos:

132.264 mg/día < CO < 442.728 mg/día

Estos valores demuestran que para un funcionamiento más efectivo de los humedales flotantes, grandes cargas orgánicas se procesan con mayor efectividad con caudales mínimos

3.5 DQO

La DQO, por definición, es una medida de la degradación de materia orgánica e inorgánica. Los análisis realizados permitieron determinar la eficiencia del sistema en cuanto a la remoción de materia a lo largo del tiempo.

Asumiendo un caudal máximo, se establecen promedios:

$$DQO_{\text{afluente}} = 52 \text{ mg/L}$$

$$DQO_{\text{efluente}} = 42.31 \text{ mg/L}$$

El porcentaje de remoción dados estos valores resulta en 18.63% de su total. Es importante considerar la escala a la cual se realizó el proyecto, esto influye directamente en la eficiencia de este tipo de sistemas.

3.6 Sólidos

Los resultados obtenidos en las pruebas de sólidos suspendidos produjeron una serie de datos que no resultaron favorables para el análisis del humedal.

Generalmente la cantidad de sólidos que se producen de acuerdo a la metodología no entraban en el rango permisible del mismo.

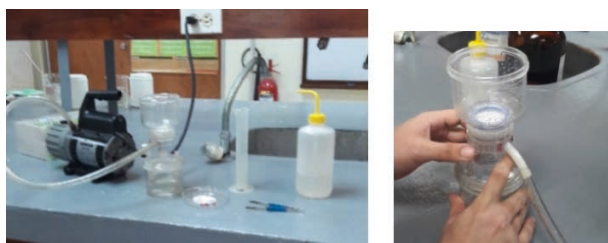


Figura 3. Metodología aplicada (filtros membranas).

(Ver figura 3).

Por las bajas velocidades que se producen en estos sistemas, buena parte de los sólidos se depositan en el fondo, por lo cual para producir mejores resultados se deberá cambiar

la metodología de estos parámetros.

Escogiendo los mejores resultados obtenidos en estas pruebas, se logró obtener la gráfica

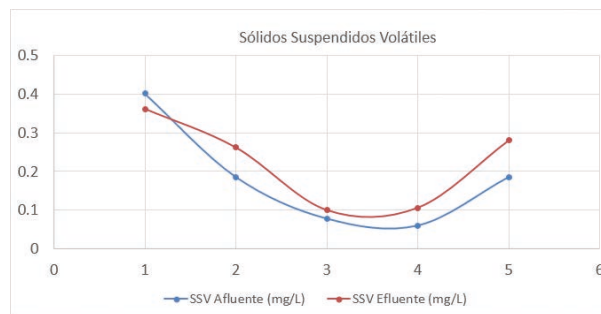


Figura 4. Comportamiento de sólidos volátiles.

presentada en la figura 4.

Los sólidos no se comportan tal y como indica la teoría correspondiente al tipo de humedal.

A medida que se desarrolló el humedal, se observó un gran crecimiento de micro crustáceos y pequeños organismos, además del constante depósito de materia orgánica en el fondo del mismo.

Como se puede ver en la figura 5, producto de la escala, no se observa una mayor diferencia en el comportamiento de los sólidos a lo largo del tiempo. En general, se debe observar una reducción de sólidos producto de bajas

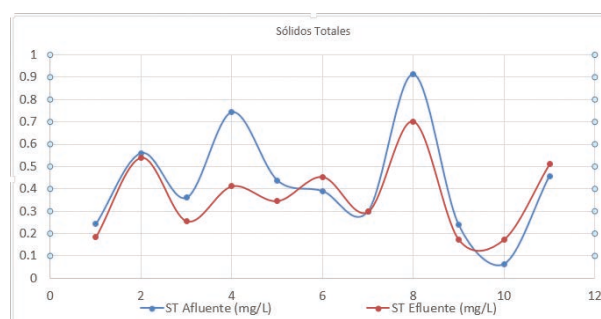


Figura 5. Comportamiento de sólidos totales.

velocidades en el humedal.

3.7 Pruebas microbiológicas

Los microorganismos son esenciales en el desempeño de cualquier sistema de tratamiento biológico. Se alojan principalmente en las

raíces de las plantas, pero dado que es un sistema expuesto, es vulnerable al ingreso de organismos indeseados, tales como larvas de mosquitos. Se pudieron observar algunas larvas y micro crustáceos tales como: (ver figura 6).

Oligochaete Dero digitata

Originalmente fue descrito como *Nais Digitata*. Esta especie fue establecida como un tipo de especie para el recién descubierto género, *Dero*, por Oken (1915).

Este tipo de larva es un vector común de enfermedades en peces de agua dulce, específicamente *Proliferative Gill Disease* (PGD), el cual resulta de larvas infectadas con *Aurantiactinomyxon* Sp. [5]

Diaphanosoma brachyurum

Es un tipo de microcrustáceo, específicamente cladóceros microfiltradores. Se les llama también zooplancton y se alimentan de fitoplancton, su abundancia depende de la biomasa presente en el medio [1].



Figura 6. A la izquierda *Dero Digitata*, a la derecha: *Diaphanosoma brachyurum*.

Organismos bacterianos

Los resultados de las pruebas microbiológicas generaron gran variedad de resultados en cuanto a la flora bacteriana que se desarrolla en este tipo de ambientes húmedos. Las condiciones presentaron formaciones como: cadenas de bacilos, cocos (individuales, cúmulos), espirilos aislados. (Ver figura 7).

La primera siembra de la *pistia stratiotes* sufrió altibajos dadas las condiciones adversas al desarrollo de un humedal en el laboratorio.

No se contaba en el momento con la iluminación necesaria para la fotosíntesis en las plantas, el caudal del sistema proporcionaba muy pocos nutrientes.

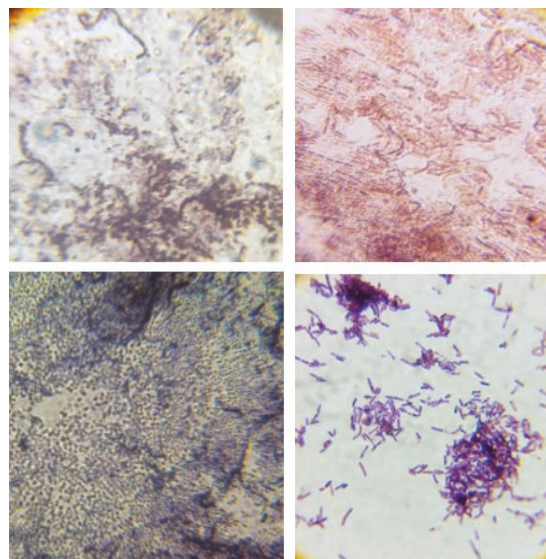


Figura 7. Imágenes obtenidas por el microscopio de la flora bacteriana.

Ya que se trataba de un sistema abierto, se sufrió de igual manera un incremento acelerado de pequeños microorganismos que se alimentan de la materia orgánica en el sistema.

Dado que la primera siembra se usó especies adultas, en la segunda se utilizaron especies más jóvenes de la misma planta. Así, se redujo la competencia por nutrientes entre ellas, y se trabajó con una escala más apropiada.

A un par de semanas de finalizar las pruebas, el caudal suministrado tuvo cambios en sus características dada la adición de glucosa ($C_6H_{12}O_6$), la cual proporcionó un aumento en los sólidos suspendidos y aumentó la biomasa.

Finalizando las pruebas, se detuvo el desarrollo de las plantas (ver figura 8).

Las plantas no adoptaron el tamaño de especies adultas, y en general las condiciones estudiadas se mantuvieron constantes.

4. Conclusiones

El uso de los sistemas de humedales flotantes tiene diversas ventajas tales como bajo costo y mantenimiento en la operación del sistema, baja producción de residuos durante la operación y es un método apropiado para descontaminar superficies grandes en plazos largos.

En el caso del sistema estudiado, las condiciones del laboratorio para lograr el funcionamiento prototipo fueron limitantes para que el humedal flotante en condiciones controladas realizara la función que estaba diseñado para lograr.

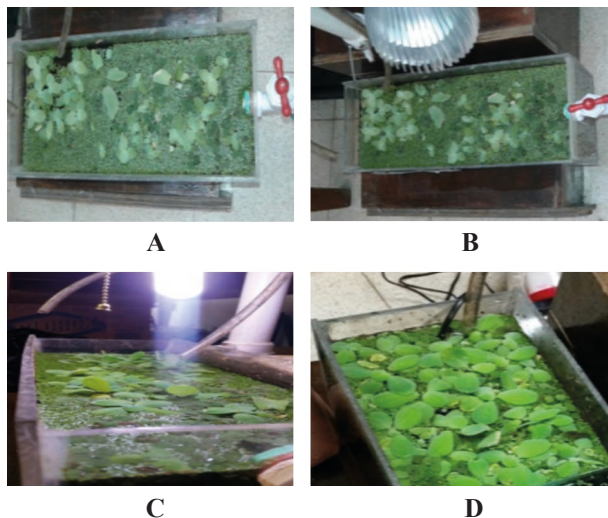


Figura 8. Ilustración 1: Descripción de la evolución del microsistema de macrófitas flotantes. A) Siembra de las macrófitas 21/09/2016; después de la siembra 03/10/2016; D) 20 días después de la siembra 10/10/2016 B) 3 días después de la siembra 23/09/2016; C) 13 días.

La profundidad del tanque y la falta de nutrientes, dio como resultado poca variación de los parámetros monitoreados. Al entender cómo funcionó el sistema el comportamiento durante los tres meses de estudio fue de esperarse, dando así la capacidad de elaborar recomendaciones y crear un proyecto funcional.

Recomendaciones

Este tipo de sistemas se caracterizan generalmente por profundidades de 0.4 a 1.5 metros, similares a los de las lagunas de estabilización, sin embargo no ocurre una proliferación de algas. (Jorge Martelo, 2012) Por lo tanto, consideramos ideal un aumento de la escala del tamaño del tanque, usando la profundidad mínima que establecen estudios

previos, lo cual permitiría un desarrollo óptimo de las raíces, las cuales son indispensables en la efectividad de este tipo de sistema.

Un régimen cosecha cuidadosamente monitoreado mejora significativamente el rendimiento de estos sistemas. Sin embargo, dada la escasez del espacio disponible, las plantas no se multiplicaban con facilidad, resultando en competencia por nutrientes y espacio.

Aumentar los ciclos de luz que dispone el humedal mejorará la capacidad fotosintética de los especímenes, pero no recomendamos su exposición al clima del exterior. Una de las principales desventajas del humedal flotante es la proliferación de vectores, específicamente mosquitos, en sus aguas.

Por último, regular de manera más cuidadosa el caudal puede beneficiar el comportamiento del humedal, además de aumentar la cantidad de nutrientes suministrados directamente en el humedal.

Referencias

- [1] Rojas, J. A. R., 1999. *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*. s.l.:Alfaomega.
- [2] Müller, 1773. ITIS Report. [En línea] Available at: https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=68904#null
- [3] Conde-Porcuna, J. E. R.-R. M.-B., 2004. El zooplankton como integrante en la estructura trófica de los sistemas acuáticos lénticos. *Ecosistemas 2*.
- [4] Jorge Martelo, J. A. L. B., 2012. Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), pp. 221-243.
- [5] María Eugenia Haro, N. O. A., 2010. *Evaluación de un humedal artificial como tratamiento de agua residual de un asentamiento irregular*. México D.F. : s.n.
- [6] L.M. Pote, B. B. T. L. L. E. F. C., 1994. The Isolation and Propagation of *Dero digitata* Infected with *Aurantiactinomyxon* Sp.. *Journal of the World Aquaculture Society*, 25(2), pp. 303-307.
- [7] Silvia Lucía Villabona-González, J. J. R.-R. J. A. P.-B. C. B., 2015. Respuesta de la biomasa zooplanctónica a los gradientes del estrato trófico y precipitación de un embalse tropical. *Revista Academia Colombiana de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(152), pp. 374-388.