

Elaboración de un modelo neuronal artificial para la estimación de turbiedad y proposición de dosificaciones en el tratamiento de aguas residuales de la industria avícola

Elaboration of an artificial neural model for the estimation of turbidity and proposition of dosifications in the wastewater treatment

Luis Octavio González-Salcedo¹
José Benjamín García-Núñez²

¹ Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Correo electrónico: logonzalezsa@unal.edu.co; orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2460-6106>

² Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Correo electrónico: jobega297011@gmail.com

Recibido: 03-08-2018 Aceptado: 02-09-2019

Cómo citar: González-Salcedo, Luis; García-Núñez, José (2020). Elaboración de un modelo neuronal artificial para la estimación de turbiedad y proposición de dosificaciones en el tratamiento de aguas residuales de la industria avícola. *Informador Técnico*, 84(1), 3-17. <https://doi.org/10.23850/22565035.1636>

Resumen

El crecimiento de la industria avícola en Colombia y el cambio en la normatividad ambiental vigente, conlleva a un mejoramiento en el sistema de tratamiento de las aguas residuales, mediante técnicas alternas entre coagulantes y floculantes. Los costos de estas técnicas requieren dosificar de manera óptima los principales productos allí involucrados. En este trabajo se usó un modelo neuronal artificial basado en redes neuronales multicapa *feedforward-backpropagation*, para la estimación del valor de la turbidez de salida en el tratamiento de las aguas residuales. Posteriormente, se usaron las redes neuronales entrenadas para proponer dosificaciones óptimas de los productos y mejorar las condiciones de operación, lo que permitió obtener aguas residuales clarificadas, para lo cual se elaboraron cartas de optimización. Respecto a la evaluación del desempeño del modelo neuronal, se usó como indicador de desempeño el factor de correlación lineal R. Los resultados de correlación entre los valores estimados y reales de la turbidez de salida muestran la confiabilidad en la aplicación como herramienta de predicción.

Palabras clave: aguas residuales; turbidez; prueba de jarras; industria avícola; inteligencia artificial; redes neuronales artificiales.

Abstract

The growth of the poultry industry in Colombia, and the change in current environmental regulations, leads to an improvement in the wastewater treatment system, through alternate techniques between coagulants and flocculants. The cost of these techniques require optimal dosing of the main products involved therein. In this work, we used an artificial neural model based on feedforward-backpropagation multilayer neural networks, to estimate the value of output turbidity in the treatment of wastewater. The trained neural networks subsequently used to propose optimal dosages of the products

and improve the operating conditions that allow obtaining clarified wastewater, so we develop optimization charts. We used the R linear correlation factor as a performance indicator, for the evaluation of the performance of the neural model. The correlation results between the estimated a real values of the output turbidity show its reliability in the application as a prediction tool.

Key words: residual waters; turbidity; jar testing; poultry industry; artificial intelligence; artificial neural networks.

1. Introducción

En los últimos 50 años Colombia ha tenido un alto crecimiento en la producción avícola, reportándose un crecimiento del 7,1 % anual, pasando de aportar el 7,0 % de la producción total nacional de carnes a un valor del 50,4 % (Aguilera-Díaz, 2014), actividad que durante su proceso productivo genera contaminación con aguas residuales que contienen sustancias tanto de naturaleza orgánica como inorgánica (Gómez-Daza, 2012). El componente orgánico se refiere a materias generalmente biodegradables conducentes a la aparición y crecimiento de microorganismos con potencial patógeno (Ocampo-Vélez; Rodríguez-Montes, 2011). Por su parte, el componente inorgánico se refiere, principalmente, al uso de químicos utilizados para limpieza y desinfección de alojamientos avícolas, así como de equipos y maquinaria industrial, que deterioran la calidad física y química del agua (Padilla-Gasca; López-López; Gallardo-Valdez, 2011).

Como alternativas de tratamiento existen los primarios (físico-químicos) que acondicionan el agua residual, previo a su ingreso al tratamiento secundario (biológico). Particularmente, en Colombia, este tipo de industria utiliza tratamientos primarios debido a la disponibilidad de espacios y costos de los mismos. Además, vierten sus aguas residuales directamente a los sistemas de alcantarillado o a fuentes de agua naturales receptoras, requiriéndose entonces un mejor tratamiento de las mismas (Toc-Aguilar, 2012).

En Colombia, la legislación ambiental en esta temática es cada vez más estricta con el fin de disminuir la contaminación y carga orgánica a las fuentes naturales de agua (Aguilera-Díaz, 2014). Una de las finalidades es la de transformar las aguas residuales en aguas clarificadas. Se ha demostrado que los catalizadores orgánicos biológicos ayudan a la degradación de las grasas, permitiendo un mejor tratamiento por el procedimiento físico-químico (Rubio-Clemente; Chica; Peñuela, 2014; Chalén-Medina; Peñafiel-Pazmiño; Saltos-Sánchez, 2017). Sin embargo, sus costos de aplicación requieren de herramientas que permitan obtener dosificaciones económicas a partir de procesos de optimización.

La literatura reporta diversos trabajos de modelación en procesos de aguas residuales a partir de diferentes técnicas o herramientas, como modelos matemáticos de regresión multivariable, metodología de superficie de respuesta, uso de software y redes neuronales artificiales. En algunos casos, la modelación se ha orientado hacia el entendimiento y comprensión del proceso del tratamiento, en otros al efecto de las variables involucradas en dichos procesos sobre la calidad del tratamiento y en otras al efecto de las dosificaciones de coagulante y floculante sobre el valor de la turbiedad (Martínez-Navarro, 2007; Acuña-Zambrano, 2008; Salgado-Reyna, 2013; Salgado *et al.*, 2013; Vásquez-Almazán; Martínez-Morales, 2014; González-Martínez, 2017).

Por su parte, la inteligencia artificial, término acuñado en 1960 por Minsky (1961a, 1961b), en su sentido más amplio indica la capacidad de un artefacto para realizar los mismos tipos de funciones que caracterizan el pensamiento humano y en estos términos, sus métodos son una respuesta al deseo de aproximar el comportamiento y el pensamiento humano a diversos sistemas para la solución de determinadas problemáticas (Haugeland, 1996, 1997; Andler, 2006). Uno de estos métodos son las redes neuronales artificiales, abstracción funcional de la estructura neuronal biológica del sistema central nervioso (ver Figura 1), que recrea desde la perspectiva biológica la estructura de un cerebro humano (Bishop, 2006).

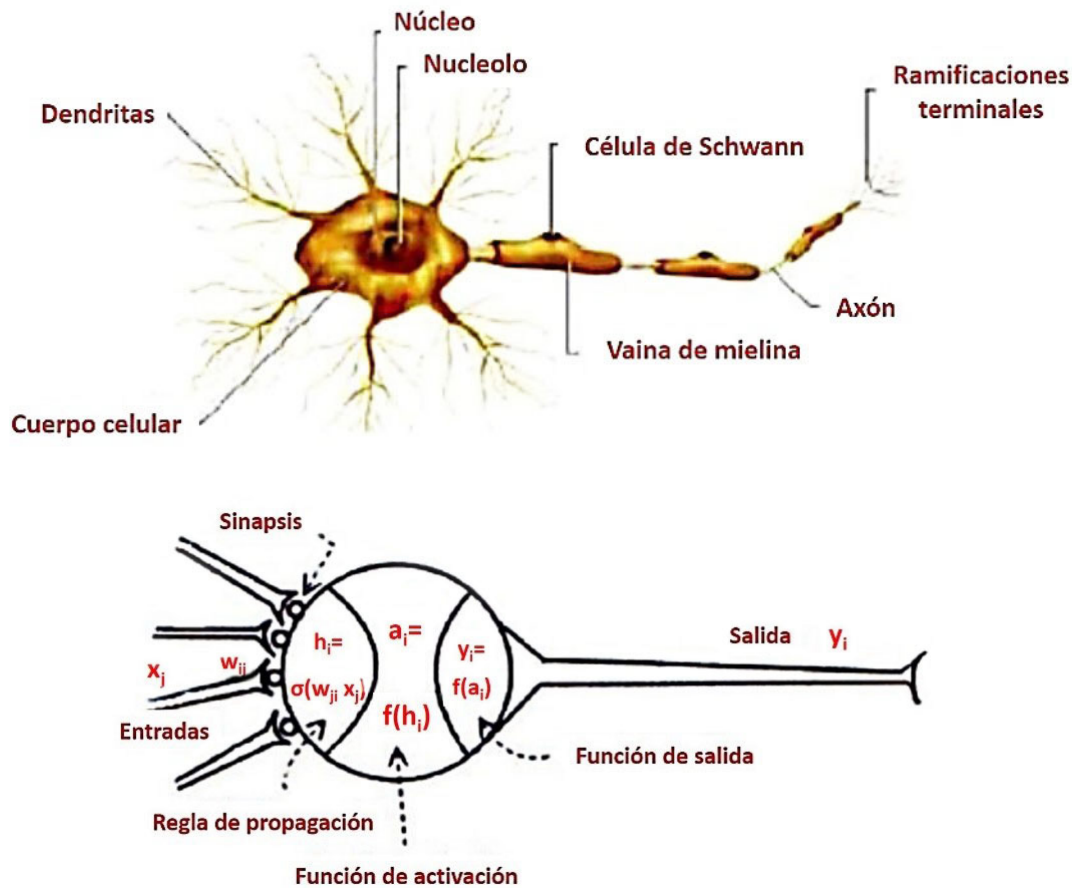


Figura 1. a) Neurona biológica b) Neurona computacional
(Adaptado de Serrano, Soria, Martín, 2010).

Las redes neuronales artificiales hoy en día son consideradas como poderosas reconocedoras y clasificadoras de patrones (Bishop, 2006), utilizadas en la solución (predicción) de problemas de ingeniería como una alternativa en sistemas complejos caracterizados por factores de interacción, en sistemas de aproximaciones estadísticas no lineales, o en sistemas de solución computacional basados en algoritmos complejos y extensos (Haykin, 2005). A su vez, involucren variables cuantitativas y cualitativas y que en estas últimas, relacionarlas en modelos matemáticos se hace difícil.

En su contexto histórico (Widrow; Lehr, 1990), las redes neuronales artificiales se iniciaron como una red monocapa denominada como Perceptrón Simple que solo podía realizar soluciones de algunas funciones lógicas como *OR*, *AND* y *NOT*, sin estimaciones numéricas; posteriormente, su desarrollo permitió estimaciones numéricas, siendo conocida como red ADALINE. Hoy en día, muchos problemas en la ingeniería son abordados a partir de redes con tres o más capas como lo es la red Perceptrón Multicapa, con un procedimiento supervisado de aprendizaje, ya que las redes se entrenan a partir del error de aproximación contra los verdaderos resultados (Bishop, 2006).

Por otro lado, en la actividad industrial y en particular en la agroindustria alimentaria (Arias-Hoyos; Hernández-Medina; Castro-Valencia; Sánchez-Peña, 2017), diferentes materiales son usados para disminuir la turbiedad del agua residual como coagulantes, floculantes y catalizadores biológicos, cuyas cantidades dependerán de situaciones ambientales como la temperatura, el pH, la cantidad y el tipo de turbiedad a tratar, entre otras. La cantidad de los productos mencionados, es determinada, generalmente, por el desempeño de un experimento conocido como Prueba de Jarras (Fúquene; Yate, 2018). Sin embargo, esta prueba experimental consume tiempo y cantidades de los productos para el tratamiento y su procedimiento también contiene errores (Ovalle-Celis; Moreno-Ripe, 2014). Lo anterior, conlleva a realizar diversas ejecuciones experimentales de la prueba hasta encontrar una turbiedad en el agua residual o condición de agua clarificada

aceptable para ser reutilizada o vertida (Fúquene; Yate, 2018) a partir de una dosificación de productos tratantes que no corresponden al óptimo, ya que se incrementan los costos del proceso, por lo cual es de interés optimizarlo.

Aun así, para Fúquene y Yate (2018) la prueba de jarras es uno de los más importantes experimentos en el control del proceso de coagulación química de aguas, en la cual se utilizan variaciones en las dosis de coagulante – floculante que determinan la reducción de coloides en suspensión y materia orgánica a través del proceso de floculación, simulando los procesos unitarios de coagulación, floculación y sedimentación, hasta llegar a los valores en los que la floculación alcanza sus mejores resultados.

Por otro lado, Haghirí; Moharramzadeh; Nahvi; Daghighi (2014) mencionan que la determinación de la dosis óptima en cuanto a coagulantes es de particular significancia, en la cual relaciones complejas entre los factores que influyen en la eficiencia del coagulante y los resultados de la prueba conllevan el problema de optimización al campo de las redes neuronales artificiales.

Al respecto, la literatura muestra un buen número de trabajos que abordan la problemática de la optimización del proceso de tratamiento de aguas usando redes neuronales artificiales (Fernández; Galvis, 2003; Acuña, 2008; Olanrewaju; Muyibi; Salawudeen; Aibinu, 2012; Salgado *et al.*, 2013; Villarreal-Campos; Caicedo-Bravo, 2013; Haghirí *et al.*, 2014; Peña-Rojas; Flóres del Pino, 2014; Prasannasangeetha, 2015; Bui; Giang-Duong; Nguyen, 2016; Barajas-Garzón; León-Luque, 2016; Peña-Rojas, 2016; Rodrigues-dos Santos; Henriques-Librantz; Días; Gozzo-Rodrigues, 2017; De Menezes; Fontes; Oliveira-Esquerre; Kalid, 2018; Haghirí; Daghighi; Moharramzadeh, 2018; Messaoud; Hellal; Imed; 2018), siendo limitado en el tratamiento de aguas residuales de procesos agroindustriales y específicamente en la industria avícola.

De este modo, en el presente estudio, se usa un modelo neuronal artificial basado en redes neuronales artificiales con arquitectura multicapa, alimentación de información hacia adelante y metodología/aprendizaje de propagación y ajuste del error hacia atrás, denominadas como Perceptrón Multicapa *feedforward – backpropagation*, para proponer dosificaciones conjuntas de un catalizador orgánico biológico y coagulantes-floculantes, elementos comercialmente disponibles en el tratamiento de las aguas residuales de la industria avícola. Las redes neuronales artificiales fueron entrenadas para predecir la turbiedad de salida del agua residual a partir de la Prueba de Jarras. El desempeño de las redes neuronales basado en el coeficiente de correlación lineal ($R > 0,98$) muestra una herramienta confiable para ser usada en la simulación de la determinación de la turbiedad de salida para diferentes dosificaciones del tratamiento. El resultado de las simulaciones graficadas en las cartas del resultado de la turbiedad de salida para diferentes condiciones de entrada del agua residual, permite definir cuáles son las dosificaciones más óptimas para obtener agua clarificada con la calidad requerida para el cumplimiento de la normatividad ambiental.

2. Procedimiento metodológico

2.1. Ubicación del proyecto

El estudio se realizó en una planta comercial, procesadora de pollo, ubicada en el municipio de Guacarí, Valle del Cauca, Colombia, la cual procesa 11000 pollos/día con un peso corporal de 1800 – 2200 g/pollo (García-Núñez, 2017).

2.2. Trabajo de campo experimental y construcción del conjunto de entrenamiento

Partiendo de un trabajo de campo experimental en donde se hizo una toma de muestras de aguas residuales denominada prueba de jarras y su correspondiente caracterización de pH, de turbiedad de entrada y de salida, se creó una base de datos para entrenar el modelo neuronal artificial (ICONTEC, 2010). Con el fin de evaluar el aporte del catalizador biológico, las muestras se dividieron en dos grupos: el primer grupo, con dosificaciones de coagulante y floculante (48 registros) y el segundo grupo, además de los dos productos mencionados, con adición de catalizador biológico (48 registros). Se utilizó como coagulante una mezcla de policloruro de aluminio como floculante un polímero ayudante de floculación y como catalizador biológico un catalizador bio-orgánico altamente concentrado, elementos comercialmente disponibles (García-Núñez, 2017). Para la estimación de la turbiedad tanto de entrada como de salida se usó un turbidímetro portátil (Hach Company, 2004).

Para ambos grupos, las variables consideradas fueron: pH de entrada [PH], turbiedad de entrada (agua cruda) [TE], dosis de coagulante [COA], dosis de floculante [FLO] y turbiedad de salida [TS]. Para el segundo grupo, se adicionó como variable la dosis de catalizador biológico [CAT]. Respecto a la base de datos, la información se almacenó en un arreglo matricial para tener en ambos grupos la variable de salida a la turbiedad de salida (agua clarificada) como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Variables de entrada y salida consideradas en la configuración de las redes neuronales artificiales para la estimación de la turbiedad de salida en aguas residuales clarificadas

Exploración	Variables de entrada, unidad de medición, [representación]	Variable de salida, unidad de medición, [representación]
1	pH, sin unidad, [PH] Turbiedad agua cruda, NTU, [TE] Dosis coagulante, ppm, [COA] Dosis floculante, ppm, [FLO]	Turbiedad agua clarificada, NTU, [TS]
2	pH, sin unidad, [PH] Turbiedad agua cruda, NTU, [TE] Dosis coagulante, ppm, [COA] Dosis floculante, ppm, [FLO] Dosis catalizador biológico, ppm, [CAT]	Turbiedad agua clarificada, NTU, [TS]

Fuente: elaboración propia.

2.3. Elaboración y entrenamiento del modelo neuronal artificial para la estimación de la turbiedad (turbiedad de salida) en aguas clarificadas

Con los conjuntos de entrenamiento mencionados anteriormente que relacionan las variables de entrada con la variable de salida, se elaboró una propuesta de modelo neuronal para cada uno y se planteó una arquitectura neuronal artificial multicapa alimentada hacia adelante y con la metodología de entrenamiento hacia atrás (ver Figura 2), denominada Perceptrón Multicapa de *feedforward – backpropagation* y cuyas características son definidas por Rumelhart, Hinton y Williams (1986) y Hinton (1987, 1988).

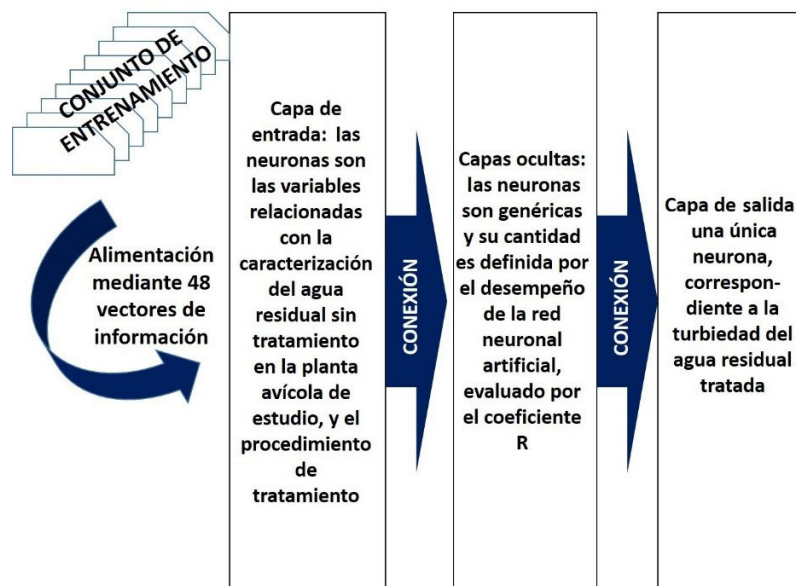


Figura 2. Propuesta de modelo neuronal para la estimación de la turbidez en aguas residuales tratadas, en una planta avícola
Fuente: elaboración propia.

Las conexiones entre neuronas de las capas se representan mediante funciones de activación. Así, la conexión entre las neuronas de la capa de entrada a cada capa oculta se realiza por medio de la función sigmoidea descrita por Hinton (1987, 1988). Por su parte, la conexión entre la última capa oculta y la neurona a estimar, ubicada en la capa de salida, se hace usando la función lineal, de manera que se permita la comparación de la estimación y del resultado verdadero, como se describe en el entrenamiento supervisado (Rumelhart *et al.*, 1986; Hinton, 1987, 1988). El procedimiento de entrenamiento para cada conjunto se realizó, de acuerdo con lo descrito por García-Núñez (2017), con 156 conformaciones de topologías de redes neuronales artificiales, obtenidas del producto entre 12 métodos de entrenamiento de backpropagation y 13 arquitecturas de capas de neuronas ocultas. Dichas conformaciones se evaluaron a partir del factor de correlación lineal R (Ecuación 1) (Vásquez...), estadístico usado para evaluar la calidad de los modelos neuronales artificiales supervisados (Steel; Torrie, 1960; Ibáñez-Quispe, 2009; Barria-Sandoval, 2009 citados por Machaca- Apaza, 2016). Para el funcionamiento computacional del procedimiento de entrenamiento se codificó un algoritmo usando el lenguaje de programación M, propio de la herramienta del software MATLAB® para la plataforma Windows® (The Math...). El código usa la librería contenida en el Neural Networks Toolbox del mismo software (Beale...), lo cual permite implementar los modelos del tipo de red que se ha descrito.

$$R = \sqrt{1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (TS_{real,i} - TS_{estimado,i})^2}{\sum_{i=1}^n (TS_{real,i})^2} \right)} \quad (1)$$

Donde, $TS_{real,i}$ es la turbiedad de salida obtenida mediante la Prueba de Jarras, la turbiedad de salida estimada por la red neuronal artificial corresponde a la posición del par de datos correlacionados y corresponde al total de datos en cada subconjunto. Los 48 vectores de información de cada conjunto de entrenamiento se categorizaron en tres subconjuntos que conformaron igual número de fases en el entrenamiento de una red neuronal: 1) de aprendizaje, en donde se configuraron los pesos sinápticos en las conexiones entre neuronas; 2) de prueba, con lo cual se determinó el momento en el que debe dejar de entrenar y optimizar la estructura de la red neuronal y las especificaciones del modelo interno, de acuerdo con el método de aprendizaje que usa el algoritmo de backpropagation; y 3) de validación, en donde se probó la capacidad de generalizar el modelo para el rango de información que se utilizó para la calibración. A partir del indicador de desempeño se evaluaron las estimaciones de las redes neuronales y las salidas reales de las bases de datos, en los subconjuntos de cada fase de entrenamiento (Aprendizaje, Prueba, Validación y una adicional de Simulación con el total de los datos, para lo cual se consideraron el 60, 20, 20 y 100 % de los datos, respectivamente, y agrupados por división aleatoria de los datos).

Los resultados de este proceso mostraron que para ambos casos de estudio (sin catalizador y con catalizador), la arquitectura con dos capas ocultas y con el método de aprendizaje de Levenberg-Marquardt obtuvieron mejores, adecuados y confiables desempeños ($R > 0,99$), que los demás métodos de entrenamiento usados (Regularización Bayesiana, Cuasi-Newton de Algoritmo BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno), Retro-propagación Resiliente, Gradiente Conjugado Escalonado, Gradiente Conjugado con Reinicio de Powell/Beale, Gradiente Conjugado de Fletcher-Powell, Gradiente Conjugado de Pollak-Ribière, Secante de un Paso, Gradiente Descendiente con Tasa de Aprendizaje Variable, Gradiente Descendiente con Momento y Gradiente Descendiente).

De esta manera, la arquitectura de la mejor red neuronal se configuró entonces para el primer caso de estudio (sin catalizador biológico) con una capa de entrada con cuatro variables de entrada: una primera capa oculta con 10 neuronas, una segunda capa oculta con 30 neuronas, una capa de salida con una variable de respuesta y un algoritmo de aprendizaje backpropagation de Levenberg-Marquardt. Por otro lado en el segundo caso de estudio (con catalizador biológico), la arquitectura de la mejor red se configuró con una capa de entrada con cinco variables de entrada: una primera capa oculta con 10 neuronas, una segunda capa oculta con 20 neuronas, una capa de salida con una variable de respuesta y un algoritmo de aprendizaje backpropagation de Levenberg-Marquardt.

2.4. Simulación de la optimización

Posterior a la elaboración y entrenamiento del modelo neuronal artificial para la estimación de la turbiedad, se seleccionaron las mejores redes neuronales para cada caso de estudio, con las cuales se llevó a cabo un proceso de simulación computacional de la Prueba de Jarras, para lo cual, a través de un código computacional en lenguaje M, se usó cada red neuronal asignada a cada grupo de información y se simuló la información de entrada y de salida de la Prueba de Jarras con las siguientes características: 1) se mantuvieron constantes las condiciones de turbiedad de entrada y pH; 2) se hizo una variación de las dosis de coagulante para dosis fijas de floculante y catalizador (en el caso del segundo grupo); y 3) se obtuvo un resultado de turbiedad de salida estimado por la red neuronal entrenada para cada caso de estudio. Esta simulación permitió recrear diversas cartas de optimización de los productos adicionados (una variación de la característica 2, correspondería a variar la dosis de floculante para dosis fijas de coagulante y catalizador) en el tratamiento del agua residual de esta explotación avícola.

3. Resultados y discusión

3.1. Tratamiento de aguas residuales y caracterización en esta explotación avícola

Desde el punto de vista ambiental y sanitario para todos los ensayos realizados, se pudo observar que la utilización del catalizador biológico permitió un mejor tratamiento basado en la disminución de los valores de turbiedad de salida (agua clarificada), lo cual se infiere al mejoramiento en la degradación de la materia orgánica. Esto es mencionado por Ekama y Wentzel (2017), quienes explican que en la remoción de la materia orgánica, el proceso biológico mediante el cual dicha materia orgánica presente en este tipo de agua residual se transforma en masa de sólidos suspendidos volátiles como organismos heterotróficos ordinarios (anabolismo) con una transferencia asociada de electrones de oxígeno y una pérdida de energía en forma de calor (catabolismo), generando en el proceso completo de la degradación vía catabolismo, un rendimiento mejor.

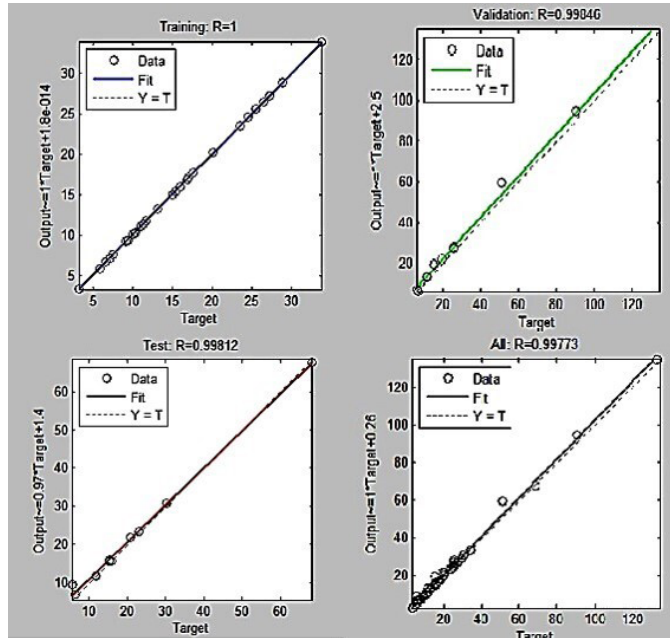
Según lo reportado por Conde-García (2012), la disminución de la turbiedad se debe, principalmente, a que además de la degradación mencionada se solubiliza la grasa, y el coagulante y floculante pueden actuar sobre los sólidos como es inferido en el caso del tratamiento de aguas residuales provenientes del sacrificio de ganado bovino. Esto sugiere usar dosificaciones bajas del catalizador (por costos) y optimizar entonces las dosificaciones del coagulante y floculante, proceso simulado en la optimización usando el modelo neuronal artificial propuesto.

3.2. Entrenamiento del modelo neuronal artificial

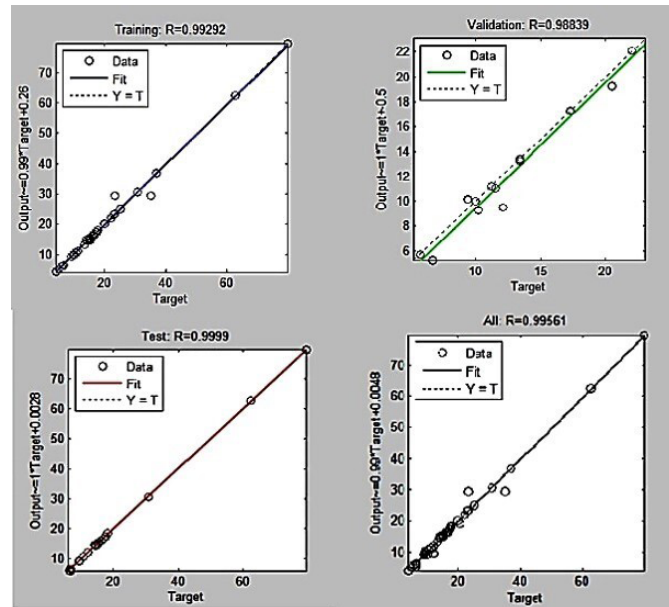
A partir de la elaboración de un modelo neuronal artificial basado en redes neuronales, correspondiente a una red neuronal artificial supervisada del tipo Perceptrón Multicapa, con alimentación hacia adelante y entrenamiento/aprendizaje para la propagación del error hacia atrás, se realizó la estimación de la turbiedad de salida (aguas clarificadas) en aguas residuales provenientes de la explotación avícola, en un proceso de tratamiento de dichas aguas residuales para dos casos: con el uso de coagulante y floculante, y con el uso de tres componentes mediante la adición de catalizador biológico.

El modelo neuronal consistió para el primer grupo (sin catalizador biológico), de una red neuronal artificial conformada por una capa de entrada con cuatro variables de entrada: una primera capa oculta con 10 neuronas, una segunda capa oculta con 30 neuronas, una capa de salida con una variable de respuesta correspondiente a la estimación de la turbiedad en aguas clarificadas y algoritmo de aprendizaje de Levenberg-Marquardt. Para el segundo grupo (con catalizador biológico), el modelo consistió de una red neuronal artificial conformada por una capa de entrada con cinco variables de entrada: una primera capa oculta con 10 neuronas, una segunda capa oculta con 20 neuronas, una capa de salida con una variable de respuesta correspondiente a la estimación de la turbiedad en aguas clarificadas y algoritmo de aprendizaje de Levenberg-Marquardt.

La Figura 3 muestra los resultados de desempeño de las redes neuronales seleccionadas en ambos casos de estudio y para cada una de las etapas de entrenamiento de la misma (entrenamiento, prueba, validación computacional y simulación con todo el conjunto de entrenamiento). Para las etapas donde las redes seleccionadas estiman la turbiedad de salida, se hace una comparación entre el resultado obtenido por la red neuronal artificial (output) y el valor obtenido usando el protocolo experimental de la Prueba de Jarras (target), para lo cual se asocia a dicha comparación el factor de correlación lineal R.



a.



b.

Figura 3. Resultados de desempeño para la red neuronal artificial entrenada para estimar la turbiedad del agua clarificada: a) sin catalizador biológico y b) con catalizador biológico. Para ambos casos, se muestra el coeficiente de correlación R entre la turbiedad de salida obtenido con la Prueba de Jarras y el estimado por el modelo neuronal, para cada fase del aprendizaje (entrenamiento, prueba, validación y simulación con todos los datos)

Fuente: elaboración propia.

Este desempeño basado en el factor de correlación lineal R ($R > 0,99$), de acuerdo con Anscombe (1973) y Achen (1982), mostraron para ambos casos una relación lineal positiva fuerte entre el valor de la turbiedad de salida obtenida a partir del protocolo experimental de la Prueba de Jarras normalizado en la NTC 3903 (ICONTEC, 2010), y el obtenido mediante la predicción de las redes neuronales artificiales seleccionadas, lo cual permite inferir que la herramienta computacional es adecuada y confiable para hacer dichas estimaciones. De acuerdo con Martínez-Rodríguez (2005), los valores del coeficiente de correlación lineal R en ambos casos, muestran que hay una aproximación del resultado obtenido por predicción, lo cual verifica la bondad en el ajuste de dicha predicción, permitiéndose inferir que el modelo computacional basado en las redes neuronales artificiales puede ser usado como metodología complementaria para la Prueba de Jarras en la estimación de la turbiedad del agua residual tanto en tratamientos con coagulante-floculante y con floculante-coagulante-catalizador biológico (p.322).

La literatura reporta diversos trabajos sobre modelación en el tratamiento de aguas residuales mediante el desarrollo de modelos matemáticos, el uso de software para modelación de procesos, la metodología de superficies de respuesta y las redes neuronales artificiales. En dichos reportes se busca, en algunos casos, comprender el proceso del tratamiento, mientras que en otros, se busca relacionar los efectos de los compuestos tipo floculante y coagulante para su optimización.

Con respecto al uso de redes neuronales artificiales, Salgado-Reyna (2013) y Salgado *et al.*, (2013) elaboraron y desarrollaron redes neuronales multicapa de backpropagation para estimar los datos de unidad de osmosis inversa en el tratamiento de aguas residuales de una planta productora de envases, en un proceso de optimización del floculante y el coagulante, obteniendo en la correlación un coeficiente de determinación $R = 0,99$. Acuña-Zambrano (2008) reporta el uso de redes neuronales multicapa de backpropagation para la correlación de pH, turbiedad, color y alcalinidad, con el fin de optimizar la dosis de coagulante en una planta de tratamiento de agua potable de una población urbana, obteniendo una correlación en el caso específico de la estimación de la turbiedad y la dosis del coagulante de $R = 0,88$. Vásquez-Almazán y Martínez-Morales (2014) reportan el desarrollo de redes neuronales artificiales, de tipo multicapa backpropagation y de funciones de base radial, para la estimación de la turbiedad del efluente en una presa, obteniendo coeficientes de correlación $R = 0,9927$ y $R = 0,986$, respectivamente.

En los últimos años, se reporta en la literatura estudios sobre el uso de redes neuronales artificiales y la optimización del coagulante en el tratamiento de aguas con el objetivo de reducir, más no reemplazar, el número de ensayos en la Prueba de Jarras para la medición de la turbiedad de salida. Al respecto, Rodrigues-dos Santos *et al.*, (2017) ($R = 0,989$), Haghir *et al.*, (2018) ($R = 0,949$) y De Menezes *et al.*, (2018) ($R = 0,900$) concluyen, de manera general, que el uso de las redes neuronales artificiales es una herramienta adecuada para determinar las mejores condiciones de control del proceso del tratamiento del agua, principalmente para estimar la dosis óptima del coagulante, lo que permite una reducción de la materia prima del tratamiento y la posibilidad de realizar investigaciones adicionales para mejorar los resultados sobre reducción de costos y consumo de materia prima.

Para las redes neuronales artificiales elaboradas en el presente estudio y entrenadas para estimar la turbiedad de salida en dos casos de tratamiento de aguas residuales (sin catalizador y con catalizador), sus resultados de desempeño evaluados a partir del coeficiente de correlación lineal R , muestran que estas estimaciones son concordantes con los trabajos mencionados y desarrollados con anterioridad, con lo cual se infiere que el uso de las redes neuronales artificiales pueden ser usadas confiablemente como herramientas de predicción para complementar los resultados experimentales involucrados en el tratamiento de aguas residuales y, en particular, en la Prueba de Jarras para la estimación de la turbiedad de salida. Sin embargo, la literatura no reporta el uso de modelos neuronales artificiales en la estimación de turbiedad para el caso de aguas residuales de la explotación pecuaria así como tampoco en el uso de tres productos (coagulante, floculante y catalizador biológico) para dicho tratamiento, lo cual brinda una agenda futura en este campo, enfocados en la optimización de las dosificaciones de los productos del tratamiento propuesto.

3.3. Simulación de un proceso de optimización usando redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales seleccionadas se usaron para simular un proceso de Prueba de Jarras para diversas condiciones de entrada. Para ambos casos de estudio se realizó la simulación. A manera de ejemplo, se muestra el caso en

el cual se tiene un pH = 7,5, diferentes valores de turbiedad de entrada y diferentes dosis del coagulante, y en el segundo caso de estudio en adición a un valor constante del catalizador biológico. Este proceso de simulación permite en cada caso construir una carta de optimización como se muestra en la Figura 4. Los resultados gráficos permiten mediante el trazado de una línea horizontal que represente el valor normativo de turbiedad aceptada en el agua clarificada, definir en cada caso la dosificación del coagulante a usar. Los resultados permiten confirmar que el uso del catalizador biológico (Figura 4-b), para todos los casos en una dosis constante, conlleva a usar una menor cantidad del coagulante.

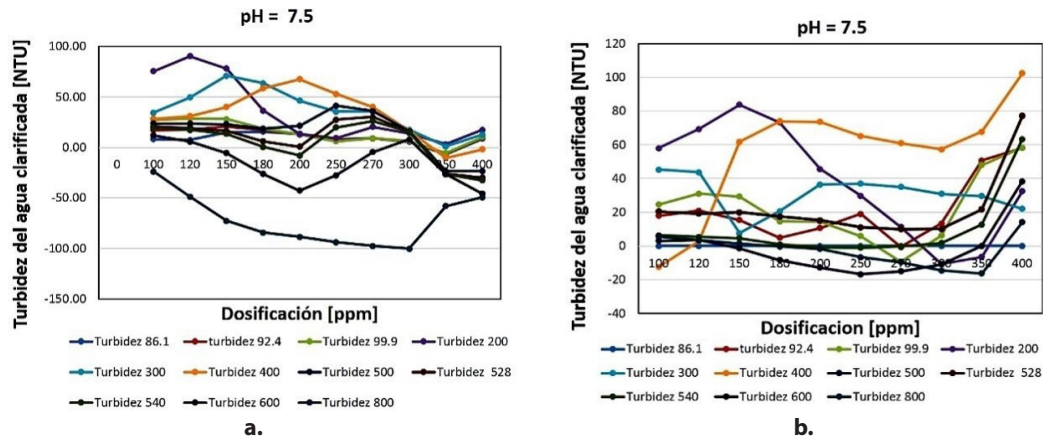


Figura 4. Ejemplo de utilización del modelo neuronal artificial para crear cartas de optimización del coagulante para un pH = 7.5: a) sin catalizador biológico; y b) con catalizador biológico. Las líneas muestran para un valor estable de pH, las diferentes condiciones de la agua residual a tratar (turbiedad del agua cruda) y mediante el uso de la red neuronal se estima la turbiedad de salida (eje vertical), de acuerdo con una dosis de coagulante (eje horizontal)
Fuente: elaboración propia.

De igual manera, la Figura 4 permite mostrar cómo en el proceso se logra un total tratamiento del agua residual (en el caso de los valores negativos que estima el modelo, y que en la realidad correspondería a “cero” turbiedad), y cómo en muchos casos el uso de valores adicionales del coagulante y/o del catalizador conllevan a “ensuciar” nuevamente el agua clarificada, lo que direccionan nuevamente un valor positivo de la turbiedad (ya en este caso el contaminante corresponde al mismo producto de tratamiento). Algunos reportes mencionan los efectos adversos en el tratamiento debido al exceso principalmente de coagulantes (Andía-Cárdenas, 2000; Castrillón-Bedoya; Giraldo, 2012; Díaz-Claros, 2014).

4. Conclusiones y recomendaciones

El trabajo permite mostrar el entrenamiento de un modelo neuronal artificial, basado en redes neuronales multicapa *feedforward-backpropagation*, para ser usado en el tratamiento de aguas residuales, en este caso para la estimación de la turbiedad del agua clarificada (turbiedad obtenida después del tratamiento del agua residual). El uso de estas redes neuronales permite en esta aplicación la reducción del número de ensayos de la Prueba de Jarras, con lo cual conlleva a un ahorro de recursos (tiempo, floculante y coagulante), enfocando la parte experimental a un número reducido de la prueba alrededor de la estimación óptima de coagulante y/o floculante. En el trabajo realizado se puede concluir que, de acuerdo con el indicador de desempeño y el comportamiento gráfico entre la relación de los valores estimados y reales, el modelo neuronal artificial entrenado y basado en este tipo de redes neuronales, son adecuadas para la realización de la estimación propuesta.

La confiabilidad de las redes neuronales artificiales entrenadas en cada caso, en los tratamientos sin catalizador y con catalizador, respectivamente, permite ser usadas para otros procesos de exploración computacional, como en este estudio, en herramienta de optimización, con lo cual se recrea la Prueba de Jarras y se realizan las cartas de optimización. De igual manera, permite confirmar la eficacia en los resultados operativos reales con la incorporación de nuevos productos (catalizador biológico) en el tratamiento de aguas residuales.

La aplicabilidad del modelo neuronal artificial en la temática del trabajo presentado, permite explorar su uso en los procesos de tratamiento de aguas residuales para diversas producciones pecuarias, es decir, ser usada en otros ámbitos, como por ejemplo, la cría de cerdos o ganado vacuno. Asimismo, se sugiere la exploración de su uso incorporando otras variables de caracterización físico-química o biológica, como en el caso de las demandas biológica y química de oxígeno, color y olor del agua cruda y tratada (estas dos últimas son variables cualitativas apropiadas para ser incluidas en modelos de inteligencia artificial), con el fin de adaptar el tratamiento a procesos más rigurosos desde el punto de vista ambiental y sanitario.

5. Referencias

- Achen, Christopher (1982). *Interpreting and Using Regression*. Series/Number 07-029. Newbury Park (CA), USA: Sage University Paper, Sage Publications.
<https://doi.org/10.4135/9781412984560>
- Acuña-Zambrano, Decsy (2008). *Modelo de correlación entre las variables medibles en línea que afectan el proceso de determinación de la dosis óptima de coagulante en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P* (tesis de pregrado) Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia. Recuperado de <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/214>
- Aguilera-Díaz, María (2014). *Determinantes del desarrollo de la avicultura en Colombia: Instituciones, organizaciones y tecnología*. Documentos de trabajos sobre Economía Regional, No. 214. Cartagena, Colombia: Centro de Estudios Económicos Regionales (CEER), Banco de la República.
<https://doi.org/10.32468/dtseru.214>
- Andía-Cárdenas, Yolanda (2000). *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*. Lima, Perú: SEDAPAL.
- Andler, Daniel (2006). Phenomenology in Artificial Intelligence and Cognitive Science. En Dreyfus, H. I.; Wrathall, M. A.; (Eds.). *A Companion to phenomenology and existentialism* (Chapter 26, pp.377-393). London, UK: Blackwell Publishing.
<https://doi.org/10.1002/9780470996508.ch26>
- Anscombe, F. J. (1973). Graphs in Statistical Analysis. *The American Statistician*, 27(1), 17-21.
<https://doi.org/10.1080/00031305.1973.10478966>
- Arias-Hoyos, Arnol; Hernández-Medina, José; Castro-Valencia, Andrés; Sánchez-Peña, Nazly (2017). Tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio: uso del polvo de la semilla de la *m. Oleifera* como coagulante natural. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 15, edición especial, 29-30.
[https://doi.org/10.18684/BSAA\(15\)29-39](https://doi.org/10.18684/BSAA(15)29-39)
- Barajas-Garzón, Claudia; León-Luque, Andrea (2016). *Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) en el proceso de coagulación – floculación para el tratamiento de agua potable por medio del uso de una red neuronal artificial* (tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://hdl.handle.net/11634/2916>
- Barría-Sandoval, Paola (2010). *Pronóstico de caudales medios mensuales en las cuencas de los ríos Baker y Pascua* (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. Recuperado de: http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-barria_ps/pdfAmont/cf-barria_ps.pdf
- Beale, Mark; Hagan, Martin; Demuth, Howard (2012). *Neural Networks Toolbox™, user's guide*. R2012a. Natick, MA, USA: The Mathworks Inc.

- Bishop, Christopher (2006). *Pattern recognition and machine learning*. Singapore, Singapore: Springer.
- Bui, Ha;Giang-Duong, Huong;Nguyen, Cuong (2016). Applying an artificial neural network to predict coagulation capacity of reactive dyeing wastewater by chitosan. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(2), 545-555. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61114>
- Castrillón-Bedoya, Daniela; Giraldo, María de los Ángeles (2012). *Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Recuperado de: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/textoyanexos/6281622H565.pdf>
- Chalén-Medina, Judith; Peñafiel-Pazmiño, Magaly; Saltos-Sánchez, Armando (2017). Eliminación de la materia orgánica e inorgánica presentes en el agua residual de una industria de pulpa de fruta empleando un catalizador enzimático. *Dominio de las Ciencias*, 3(3), 362-376.
- Conde-García, Érika; (2012). *Evaluación del proceso de electrocoagulación sobre aguas de lavado con contenido de lactosuero* (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia. Recuperado de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/9020>
- De Menezes, F. C.; Fontes, R. M.; Oliveira-Esquerre, K. P.; Kalid, R. (2018). Application of uncertainty analysis of artificial neural networks of predicting coagulant and alkalizer dosages in a water treatment process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 35(4), 1369-1381. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20180354s20170039>
- Díaz-Claros, José Nahum; (2014). *Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas* (tesis de maestría). Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán, San Pedro Sula Cortés, Honduras.
- Ekama, George; Wentzel, Mark; (2017). Remoción de materia orgánica. Capítulo 4. En: López V., C.M.; Buitrón M., G.; García, H.A.; Cervantes C., F.J.; (eds., versión en español). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño*. (pp. 57-96). Londres, Reino Unido: IWA Publishing, Cambridge University Press.
- Fernández, Edgar; Galvis, Alberto (octubre de 2003). Artificial Neural Networks Model used for clear water treatment plants. En *Seminario Internacional «La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos»-AGUA 2003*. Cartagena, Colombia. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/1b07/33cd7885b5d9af7319fd14dfbb318ae0215a.pdf>
- Fúquene, Diana; Yate, Andrea; (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Working Papers ECAPMA*, (1), 1-7. <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>
- García-Núñez, José (2017). *Optimización de la utilización de catalizadores orgánicos biológicos en el tratamiento de aguas residuales de la industria avícola usando Redes Neuronales Artificiales* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira, Colombia.
- Gómez-Daza, Elcy (2012). *Estudio de gestión ambiental para la Empresa Avícola Agrícola Mercantil del Cauca – AGRICAA S.A* (tesis de maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia. Recuperado de http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/563/402_Gomez_Daza_Elcy_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- González-Martínez, Álvaro (2017). *Modelado y simulación de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) empleando el software GPS-X* (tesis de maestría). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San

- Luis Potosí, México.
Recuperado de <http://ciep.ing.uaslp.mx/tesis/tesisPDF/233201813958.pdf>
- Hach Company (2004). *Turbidímetro Portátil Modelo 2100p ISO. Manual del instrumento*. Recuperado de <https://dk.hach.com/asset-get.download.jsa?id=25593612953>
- Haghiri, Sadaf; Daghighi, Amin; Moharramzadeh, Sina (2018). Optimum coagulant forecasting by Modeling Jar Test Experiments using ANNs. *Drinking Water Engineering and Science*, (11), 1-8. <https://doi.org/10.5194/dwes-11-1-2018>
- Haghiri, Sadaf; Moharramzadeh, Sina; Nahvi, Ali; Daghighi, Amin (December 2014). Modeling the jar test experiments using artificial neural networks to predict the optimum coagulant. En *2nd International Congress on Structure, Architecture and Urban Development*, Tabriz, Iran.
- Haugeland, John (1996). Body and world: a review of what computers still can't do: a critique of artificial reason (Hubert I. Dreyfus). *Artificial intelligence*, 80, 119-128. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(95\)00084-4](https://doi.org/10.1016/0004-3702(95)00084-4)
- Haugeland, John (Ed.). (1997). *Mind Design II: Philosophy, Psychology, Artificial Intelligence*. 2nd edition, Cambridge, MS, USA: MIT Press.
- Haykin, Simon (2005). *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*. 9th Indian Edition. Delhi, India: Pearson Prentice Hall.
- Hinton, Geoffrey (1987). *Connectionist learning procedures*. Technical Report CMU-CS-87-115. Pittsburg, PA, USA: Computer Science Department, Carnegie-Mellon University.
- Hinton, Geoffrey (1988). Connectionist Learning Procedures. *Artificial Intelligence*, 40(1-3), 185-234. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(89\)90049-0](https://doi.org/10.1016/0004-3702(89)90049-0)
- Ibáñez-Quispe, Victor (2009). *Análisis y diseño de experimentos*. Puno, Perú: Editorial Universitaria, Universidad Nacional del Altiplano.
- ICONTEC. (2010). NTC 3903:2010. Procedimiento para el ensayo de coagulación – floculación en un recipiente con agua o Método de Jarras / ICONTEC, Bogotá, Colombia.
- León-Duque, A. J.; Barajas, C. L.; Peña-Guzmán, C. A.; (2016). Determination of the Optimal Dosage of Aluminum Sulfate in the Coagulation-Flocculation process using an Artificial Neural Network. *International Journal of Environment Science and Development*, 7(5), 346-350. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2016.V7.797>
- Machaca-Apaza, Lianne (2016). *Estimación de la evapotranspiración de referencia utilizando modelos de redes neuronales artificiales en función de elementos climáticos en la cuenca del río Huancané* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4612>
- Martínez-Navarro, Fabiola (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional* (tesis doctoral). Universidad de Castilla La Mancha, Ciudad Real, España.
Recuperado de <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/984>
- Martínez-Rodríguez, Elena (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, (38), 315-332.
- Messaoud, Djeddou; Hellal, Aouatef; Imed, Loukam; (June of 2018). Waste treatment plant performances

- modelling using Artificial Neural Networks. In: *Ecotechnologies for Wastewater Treatment*, Ontario, Canada.
- Minsky, Marvin (1961a). Steps toward Artificial Intelligence. *Proceedings of the IRE*, 49(1), 8-30. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1961.287775>
- Minsky, Marvin (1961b). A selected descriptor-indexed bibliography to the literature on artificial intelligence. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, vol. HFE-2(1), 39-55. <https://doi.org/10.1109/THFE2.1961.4503297>
- Ocampo-Vélez, Luisa; Rodríguez-Montes, John (2011); *Gestión del recurso hídrico en el subsector avícola de la cuenca del río La Vieja* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/2076>
- Olanrewaju, R. F.; Muyibi, S. A.; Salawudeen, T. O.; Aibinu, A. M. (2012). An intelligent modeling of coagulant dosing system for water treatment plants based on artificial neural network. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(1), 93-99. Recuperado de <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123074724>
- Ovalle-Celis, Ruthbel; Moreno-Ripe, Cristian; (2014). *Cartilla guía para la ejecución de prácticas de laboratorio en saneamiento de agua potable* (tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1797/1/Proyecto.pdf>
- Padilla-Gasca, Edith; López-López, Alberto; Gallardo-Valdez, Juan; (2011). Evaluation of stability factors in the anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater. *Journal of Bioremediation and Biodegradation*, 2(1), 114-118. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000114>
- Peña-Rojas, Anieval (2016). *Uso de redes neuronales artificiales para optimizar la dosificación de coagulantes en la planta de tratamiento de agua potable – Huancayo* (tesis doctoral). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2841/P10-P4-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Peña-Rojas, Anieval; Flores del Pino, Lisveth (2014). Redes neuronales para el tratamiento de agua potable en zona de altitud del Perú. *Ambiente y Desarrollo*, 18(35), 109-116. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.AyD18-35.rnta>
- Prasannasangeetha, A. (2015). Optimization of Coagulant using Artificial Neural Network. *International Journal of Science and Engineering Research*, 3(4), 1-4. Recuperado de <http://www.ijoser.org/Files/174.pdf>
- Rodrigues-dos Santos, Fábio; Henriques-Librantz, André; Días, Cleber; Gozzo-Rodrigues, Sheila (2017). Intelligent system for improving dosage control. *Acta Scientiarum. Technology*, 39(1), 33-38. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i1.29353>
- Rubio-Clemente, Ainhoa; Chica, Edwin; Peñuela, Gustavo (2014). Aplicación del proceso fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 211-223. <https://doi.org/10.25100/iyc.v16i2.3696>
- Rumelhart, David E.; Hinton, Geoffrey E.; Williams, Ronald J. (1986). Learning internal representations by error propagation. Chapter 8: In: *Parallel Distributed Processing*. Vol. 1, pp. 318-362., MIT Press. Cambridge, MA, USA. Recuperado de https://web.stanford.edu/class/psych209a/ReadingsByDate/02_06/PDPVolIChapter8.pdf

- Salgado, A.; Soto, E.; Gómez, R.; Cerino, F. J.; García, R. B.; Garza, M. T.; Loredó, J. A.; Alcalá, M. M. (2013). Modelación de un tratamiento avanzado de aguas residuales, provenientes de una planta de envasado, usando las metodologías de análisis de superficie de respuesta (ASR) y de redes neuronales (RNA). *Química Hoy Chemistry Sciences*, 3(2), 42-53.
- Salgado-Reyna, Alejandro (2013). *Uso de redes neuronales artificiales (RNA) para la modelación de una unidad de ósmosis inversa en una planta piloto de tratamiento de aguas residuales* (tesis doctoral). Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/3959/>
- Serrano, Antonio José; Soria Olivas, Emilio; Martín, José David; (2010). *Redes neuronales artificiales*. Curso 2009-2010. Valencia, España: Universidad de Valencia.
Recuperado de http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/1-2/libro_ocw_libro_de_redes.pdf
- Steel, R. G.; Torrie, J. H. (1960). *Principles and Procedures of Statistics with Special Reference to the Biological Sciences*. London, UK: Mcgraw-Hill.
doi.org/10.1002/bimj.19620040313
- The Mathworks Inc.; (2008). *Matlab® & simulink® Release 2008a, Installation Guide for Windows*. Natick, MA, USA: The Mathworks Inc.
- Toc-Aguilar, René (2012). *Efecto de los microorganismos eficientes (M.E.) en las aguas residuales de la granja porcina de Zamorano, Honduras* (tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.
Recuperado de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/1039/1/T3265.pdf>
- Vásquez-Almazán, María; Martínez-Morales, José (octubre de 2014). Modelado de la calidad del efluente en el tratamiento de aguas residuales mediante Redes Neuronales Artificiales. *XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático – CLCA*. Asociación de México de Control Automático, Cancún, México.
Recuperado de <http://amca.mx/memorias/amca2014/media/files/0140.pdf>
- Villarreal-Campos, Carlos; Caicedo-Bravo, Eduardo; (2013). Técnicas de inteligencia computacional aplicadas a modelos de estimación de coagulante en el proceso de potabilización de agua. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (69), 205-215.
- Widrow, Bernard; Lehr, Michael (1990). 30 years of adaptive neural networks: perceptrons, madaline, and backpropagation. *Proceedings of the IEEE*, 78(9), 1415-1442.
<https://doi.org/10.1109/5.58323>

Caracterización fitoquímica de las hojas de *Phytolacca americana* y determinación de su potencial antifúngico

Phytochemical characterization of *phytolacca americana* leaves and determination of their antifungal potential

Edith Tipaz-Tipaz¹
Cindy Restrepo-Burgos²
Paola Solarte-Niquinas³
Natali Mena-Guerrero⁴

¹ Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia). Correo electrónico: etipaz@sena.edu.co; orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8848-7671>

² Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia). Correo electrónico: vanechemistry@gmail.com; orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9221-2080>

³ Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: nathiasolarte@gmail.com; orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1950-1430>

⁴ Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: natali.mena@correounivalle.edu.co; orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8429-4613>

Recibido: 21-09-2018 Aceptado: 27-06-2019

Cómo citar: Tipaz-Tipaz, Edith; Restrepo-Burgos, Cindy; Solarte-Niquinas, Paola; Mena-Guerrero, Natali; (2019). Caracterización fitoquímica de las hojas de *Phytolacca americana* y determinación de su potencial antifúngico. *Informador Técnico*, 84(1), 18-34. <https://doi.org/10.23850/22565035.1804>

Resumen

La *Phytolacca americana* es una especie de planta de la familia *Phytolaccaceae* nativa del Norte de América utilizada como tratamiento autóctono en enfermedades comunes y controversiales como el cáncer, debido a sus propiedades analgésicas, antiinflamatorias y antimicóticas. El objeto de este estudio fue caracterizar a nivel fitoquímico los compuestos presentes en las hojas de esta planta y determinar su potencial antifúngico. Para ello, se evaluaron tres condiciones de secado: temperatura ambiente ($12 \pm 2^\circ\text{C}$), 22°C y 40°C ; técnica de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) y espectrofotometría UV / VIS donde se evidenció que las condiciones de secado no influyeron en la estabilidad de los grupos biosintéticos. Además, se identificaron metabolitos secundarios mediante *screening* fitoquímico como flavonoides, saponinas, cumarinas y taninos en extractos etanólicos que se analizaron mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas con bombardeo electrónico, en donde se reconocieron ácidos esenciales con fines comerciales como el ácido oleico. Finalmente, se evaluó el potencial antifúngico de los extractos etanólicos con concentraciones de 60 a 300 mg/mL, en cuatro tipos de cepas: *F. solani*, *A. brasiliensis*, *S. kudriavzevii* y *C. albicans*, los resultados mostraron mayores diámetros de inhibición de 18 y 19 mm contra las cepas *F. solani* y *C. albicans*, respectivamente.

Palabras clave: *screening* fitoquímico; metabolitos secundarios; actividad antifúngica; ácido oleico.

Abstract

Phytolacca americana is a species of the *Phytolaccaceae* family native to North America. *P. americana* is used as a folk medicine to treat inflammation, fungal infections, rashes and breast problems; moreover, recent publications support possible anti-cancer properties. The purpose of this study was to characterize and compare the phytochemical constituents of the leaves of *P. americana*, and determine their antifungal potential. For this, three temperatures were evaluated to dry the leaves: ambient temperature ($12 \pm 2^\circ\text{C}$), 22°C and 40°C , then extracts of the leaves were obtained by ethanol extraction. FTIR and UV / VIS

spectroscopy analysis of the extracts shows that the drying temperatures do not affect the stability of the biosynthetic groups. Main secondary metabolites such as flavonoids, saponins, coumarins and tannins were determined by phytochemical screening. Furthermore, extracts were analyzed by means of gas chromatography coupled to mass spectrometry (GC-MS), essential acids such as octadecanoic and some alcohols were identified. Finally, the antifungal potential of ethanolic extracts with concentrations of 60 to 300 mg/mL was evaluated in four types of strains: *F. solani* (ATCC 36031), *A. brasiliensis*, *S. kudriavzevii* and *C. albicans*. Results shows inhibition diameters of 18 and 19 mm for *F. solani* and *C. albicans* strains respectively.

Keywords: phytochemical characterization; antifungal potential; *Phytolacca americana*; oleic acid.

1. Introducción

La *P. americana* es una especie de planta de la familia *Phytolaccaceae* nativa del Norte de América, cultivada ampliamente en China y actualmente se encuentra fácilmente en la región andina de Colombia, específicamente en la zona sur del departamento de Nariño. Aunque es una planta altamente tóxica para el ganado y los seres humanos, en 1820 la farmacopea de los EE.UU. declaró esta como un analgésico y antiinflamatorio (Lady Bird Johnson Wildflower Center, citado el 11 de julio de 2017; Natural Remedies citado el 14 de junio de 2017), pues algunas partes de la *P. americana* se usan como medicamento si se preparan correctamente (Irvin, 1975; Iwakiri *et al.*, 2013; Taylor, citado el 4 de agosto de 2017).

Los americanos nativos usaron el té de las bayas de la *P. americana* para curar el reumatismo, artritis, disentería y pechos doloridos, la raíz para el reumatismo, los dolores neurálgicos y los moretones (Hernández-Niño, 2010). En todas las partes de la planta, en especial en la raíz, se ha determinado la presencia de *phytolaccatoxin* relacionado con la presencia de *Saponinas triterpenoides*, *alcaloides Phytolaccin*, *histaminas* y una proteína enzimática denominada *Phytolaccaina G*. Los extractos de proteínas obtenidos de las raíces de esta planta, han sido comparados con la actividad mitogénica comercial del pokeweedTM; así mismo, tienen una potente actividad citotóxica una vez ingresa al citoplasma de una célula (Yang; Wiczorck; Allen; Nett, 2003).

La población del municipio de Túquerres, departamento de Nariño, Colombia, tradicionalmente ha dependido de las plantas medicinales para sus curaciones. Sin embargo, desconoce muchas propiedades que estas plantas pueden ofrecer en el tratamiento de enfermedades. Por eso, este trabajo involucra el estudio de los metabolitos secundarios de plantas como la *P. americana* que se encuentra fácilmente en la zona rural de este municipio, con el propósito de contribuir a la determinación taxonómica y la actividad biológica de esta planta. Por ejemplo, las saponinas triterpénicas denominadas *Phytolacca-saponinas*, aisladas de la raíz de la *P. americana* fueron incluidas en procesos de investigación contra el cáncer de ovario y otros tumores adiposos o con propósitos de adelgazamiento (Hernández-Niño, 2010; Rojas-Quintero, 2011; Sanabria, 1983). Es decir, se puede contribuir a la producción de fármacos con potenciales clínicos a partir de extractos vegetales.

Con respecto a la actividad antifúngica, actualmente existen fármacos comerciales para tratar diferentes tipos de micosis, como anfotericina B, ketoconazol, fluconazol, entre otros; sin embargo, por su alta toxicidad pueden producir daños en las células hospedadoras de los humanos, de ahí el interés por los productos naturales y sus posibles aplicaciones en la industria farmacéutica (Treviño *et al.*, 2012). Aunque existen estudios con relación a la actividad antimicrobiana de extractos de plantas vegetales (Navarro-García *et al.*, 2003; Kim; Chom; Han, 2013; Davicino *et al.*, 2007); en la *P. americana* son mínimas las evidencias de la actividad contra microorganismos, pues solo se encontró una información preliminar sobre que por sus características hidrofóbicas en la superficie de las hojas, se pueden encontrar proteínas antimicrobianas, lo que proporcionó una pista para realizar una determinación del potencial antifúngico de esta planta (Peng *et al.*, 2005). Por otro lado, para garantizar los beneficios de las propiedades curativas de estas plantas, se hace necesario determinar ciertos parámetros físicos como la temperatura, que no alteren las estructuras internas de los componentes, en especial los compuestos volátiles. En este sentido, se debe evaluar las condiciones de secado del material vegetal, debido a las posibles pérdidas de aceite esencial, sustancias volátiles, degradación de sustancias termolábiles o para el aislamiento de sustancias naturales puras. Por lo anterior, Sharapin (2000), sugiere

secar a temperaturas inferiores a los 40 °C, donde se garantice una buena circulación de aire. En este orden de ideas, en este trabajo se evaluaron tres condiciones de secado adecuadas para la conservación de las moléculas de interés presentes en las hojas de *P. americana*.

Además, se determinó la presencia de metabolitos secundarios mediante *screening* fitoquímico y se realizó un análisis por cromatografía de gases acoplado a masas con bombardeo electrónico para identificar cualitativamente algunos ácidos esenciales. Finalmente, se evaluó la actividad antifúngica en cuatro tipos de cepas tales como *F. Solani* y *A. Brasiliensis*, *S. kudriavzevii* y *C. albicans*, con el objeto de contribuir al conocimiento de las propiedades de plantas nativas en vía de extinción como lo es la *P. americana* y promover el uso de las mismas en el campo terapéutico, en la agricultura y en las industrias farmacéuticas y alimenticias.

2. Metodología

2.1. Colección del material vegetal

Las hojas frescas de *P. americana* se recolectaron en época de invierno, entre mayo y julio, en el corregimiento de Pinzón, Sabana de Túquerres, Nariño (Colombia). Esta planta fue identificada botánicamente en el Herbario - CUVC Luis Sigifredo Espinal-Tascón de la Universidad del Valle. Las hojas se lavaron cuidadosamente con agua destilada hasta posterior análisis.

2.2. Preparación de extractos vegetales

Las hojas lavadas con agua destilada se sometieron a proceso de secado en un horno de convección forzada BINDER FD 53- UL, en donde se evaluaron dos condiciones de temperatura 22 °C y 40 °C (Martínez, 2006), y una tercera condición de secado a temperatura ambiente promedio de la sabana de Túquerres, Nariño (12 ± 2 °C). Con referencia a la extracción, se siguió la metodología expuesta por Sanabria (1983), se maceró durante 12 a 15 horas 50 g del material vegetal seco usando 600 mL de etanol (Merck) al 95 % y n-hexano (Merck), respectivamente. Posteriormente, se colocó a reflujo durante 1 hora, luego se filtró al vacío y el residuo se lavó con 100 mL del solvente, también evaluado en el momento. Las disoluciones procedentes se filtraron y luego se concentraron al vacío en un rotaevaporador a 40 °C. Los extractos obtenidos se conservaron en frascos de tipo ámbar hasta su posterior análisis.

2.3. Evaluación de las condiciones de secado

Los extractos etanólicos obtenidos de las tres condiciones de secado (22 °C, 40 °C y temperatura ambiente), se caracterizaron por la técnica espectroscópica, los métodos aplicados fueron: infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR por sus siglas en inglés) en un rango de 600 a 4000 cm^{-1} y UV / VIS en todo el rango de longitud de onda (250–900 nm) (Skoog, 1998).

2.4. Screening fitoquímico

Los extractos de etanol y hexano obtenidos a una temperatura de secado de 40 °C de las hojas de *P. americana*, fueron sometidos a diferentes test, con el propósito de determinar la presencia de taninos, saponinas, cumarinas, flavonoides, fenoles y alcaloides siguiendo la siguiente metodología con algunas modificaciones:

Test de taninos: el extracto se agitó separadamente con agua destilada (10 mL), luego se filtró y se adicionó cinco gotas de FeCl_3 al 5 %. La coloración negra o azul-verde o precipitado indicó la presencia de taninos (Andriani *et al.*, 2015).

Test de saponinas: en un tubo de ensayo se tomó 0,5 g de extracto, se adicionó 10 mL de agua destilada y se agitó vigorosamente. La formación de 2 cm de capa de espuma que persistió en el calentamiento en un baño de agua durante 5 min, mostró la presencia de saponinas (Andriani *et al.*, 2015; Khanam; Wen; Bhat, 2015).

Test de cumarinas: a partir de los extractos se realizó una dilución siguiendo la proporción 9:1, extracto: agua, de la cual se tomaron 2 mL en un tubo de vidrio con tapa, con una tira de papel filtro dentro del tubo previamente empapado de una solución alcalina de NaOH (0,06 g/mL). Sin tocar el extracto dentro del tubo, se tapó y se calentó en un mechero Bunsen hasta desprendimiento de vapor, luego se llevó el papel filtro a una lámpara UV (UVP, UVLS-26), se observaron puntos fluorescentes (amarillos verdosos) sobre el papel, por lo tanto, la muestra se consideró positiva para cumarinas (Hinojosa- Dávalos *et al.*, 2013).

Test de flavonoides: a 1 mL de cada extracto en tubos de ensayo se agregaron 0,5 g de magnesio en polvo y cinco gotas de ácido clorhídrico al 10 % hasta el desprendimiento de hidrógeno. Los colores rosados, anaranjado o fresa indicaron prueba positiva; la prueba es conocida como reacción de shinoda (Khanam *et al.*, 2015; Rondón *et al.*, 2018).

Test de fenoles: a 50 mg de extracto se adicionaron 5 mL de agua destilada y unas pocas gotas de FeCl₃ al 5 %. El color negro azulado indicó la presencia de compuestos fenólicos (Andriani *et al.*, 2015).

Test de alcaloides: a 15 mg de cada extracto se agregaron 6 mL de HCl al 1 %, la mezcla se dejó en un baño de agua por 5 min y se filtró. El filtrado se dividió en tres partes iguales (0,5 mL aproximadamente); al primero se adicionó cinco gotas del reactivo de Drangerdorff, si presentaba color rojo naranja, indicaba la presencia de alcaloides; al segundo se adicionó 1 mL de reactivo de Mayer, la formación de un precipitado color crema indicó prueba positiva; y al último filtrado se agregó cinco gotas de la solución de reactivo de Wagner, la formación de un precipitado de color marrón indicó la presencia de alcaloides (Iqbal; Salim; Lim, 2015).

2.5. Análisis cromatográfico

El uso de la cromatografía de gases acoplada a un espectrómetro de masas requiere sistemas especiales de conexión. En principio, se trata de dos técnicas que trabajan en fase gaseosa y necesitan una muy pequeña cantidad de muestra para su análisis, por lo que son muy compatibles. Por lo tanto, se realizó una identificación de posibles componentes presentes en los extractos en etanol y hexano de las hojas de *P. americana* y se realizó por medio de un cromatógrafo de gases acoplado a espectrómetro de masas Shimadzu CG-EM QP-2010, equipado con un autoinyector AOC-20i, automuestreador AOC-20s, inyección Split/splitless, modo de ionización EI/SCI/NCI y sonda de inserción directa controlada por el software CGMS-solution, la columna utilizada fue una columna DB-5MS.

El método cromatográfico y espectrométrico utilizado, corresponde a una temperatura de horno de 200 °C, temperatura de inyección de 300 °C, modo de inyección split que varía de 10:1 a 30:1 dependiendo de la concentración de las especies, modo de control de flujo velocidad lineal, flujo de la columna de 0,60 mL/min, velocidad lineal de 30 cm/s, gas de arrastre helio, temperatura de la fuente de iones de 230 °C y temperatura de la interfase de 280 °C. El intervalo de confianza del método fue del 95 %. El equipo tiene acoplada la biblioteca Nist Research Librar.

2.6. Evaluación de la actividad antifúngica

La evaluación de la actividad antifúngica se realizó por el método de difusión de pozos en agar. A partir del cultivo de cada cepa con micelio, se tomaron con un asa las esporas de estos y se diluyeron en un tubo de ensayo con caldo peptona de harina de soja de la casa Merck KGaA previamente esterilizado. Posteriormente, se mezclaron por agitación en un agitador mecánico de tubos (Vortex Mixer, Modelo: VM-300P). Luego, el inóculo se sembró por estriado en las placas de 9,1 cm de diámetro con agar potato dextrosa y sabourand dextrosa al 4 % (de acuerdo con el tipo de cepa) previamente solidificado, en cada placa se realizaron perforaciones distribuidas en forma adecuada, según las concentraciones de los extractos. Enseguida, se incorporaron 20 µL de cada una de las concentraciones del extracto diluido a los pozos de 6 mm de diámetro (Sanabria; Mantilla, 1986; Quiroga; Sampietro; Vattuone, 2001). Como control positivo, en uno de los pozos se adicionó tiabendazol y como control negativo en otro pozo se usó etanol al 96 %.

Posteriormente, las placas *S. kudriavzevii* y *C. albicans* se incubaron aeróbicamente a 30 °C y las placas *F. solani* y *A. brasiliensis* a 25 °C, de acuerdo con sus fichas técnicas. De esta forma, se realizaron tres repeticiones para cada

concentración de extracto (60, 120, 180, 240 y 300 mg/mL). Con relación al diámetro de inhibición de los micelios, en todas las placas se verificó luego de 72 h después de incubación lo requerido para un crecimiento visible (Navarro-García *et al.*, 2003; Parveen; Ghalib; Khanam; Mehdi; Ali, 2010). Los resultados fueron medidos y expresados en milímetros en términos de diámetro de inhibición de crecimiento alrededor de cada disco, donde se determinaron diferentes condiciones relacionadas a la actividad: sin actividad (1-6 mm), actividad moderada (7-10 mm), actividad alta (11-15 mm), actividad muy alta (16-20 mm) (Parveen *et al.*, 2010).

El índice antimicrobiano se calculó usando la ecuación 1.

$$\text{Índice antimicrobiano} = (1 - D_a/D_b) * 100 \quad (1)$$

Donde D_a es el diámetro de crecimiento del hongo en el extracto, y D_b es el diámetro de crecimiento del hongo en el control positivo.

2.7. Análisis estadístico

Se analizaron los resultados por medio del programa STATGRAPHICS Centurión XVI Versión 16.1.15, en donde se calculó un ANOVA, con lo cual se evaluaron medias y, además, se identificó si hubo diferencias significativas en las concentraciones del extracto evaluadas para cada cepa.

3. Resultados y discusión

3.1. Condiciones de secado

Las plantas con usos medicinales contienen compuestos volátiles de interés farmacéutico. Estos compuestos se producen por rutas biosintéticas de metabolitos secundarios no volátiles, lo que explica su diversidad. Los terpenos son uno de estos compuestos y son los más relevantes por su actividad biológica, seguidos de los derivados de ácidos grasos (hidrocarburos saturados e insaturados), bencenoides y fenilpropanoides; aunque también se han reportado sustancias azufradas y nitrogenadas en plantas medicinales (Dudareva *et al.*, 2005).

En los resultados de los FTIR de las muestras que fueron procesadas en cada una de las temperaturas que se evaluaron, se observaron bandas cercanas a los 3000 cm^{-1} correspondientes a la presencia de grupos insaturados $=\text{CH}-$, picos comunes correspondientes al $-\text{OH}$ entre los 2300 y 3700 cm^{-1} (usuales en estas plantas, representan grupos correspondientes a alcohol), ácidos carboxílicos y fenólicos que demuestra que se mantienen compuestos volátiles de bajo peso molecular. Por otra parte, se evidenciaron picos entre los 1053 - 1062 cm^{-1} correspondientes a grupos alquilo. Con relación al enlace CO de ácidos carboxílicos no iónicos, se observó cercano en 1735 - 1738 y 1244 - 1248 cm^{-1} , junto con la vibración asimétrica de grupos carboxilato iónicos en 1618 - 1645 y 1375 - 1385 cm^{-1} . Es decir, que los resultados cualitativos indicaron que la temperatura no influyó en proceso de extracción, asimismo, los análisis de FTIR evidenciaron picos similares independientes de la temperatura de secado (ver Figura 1).

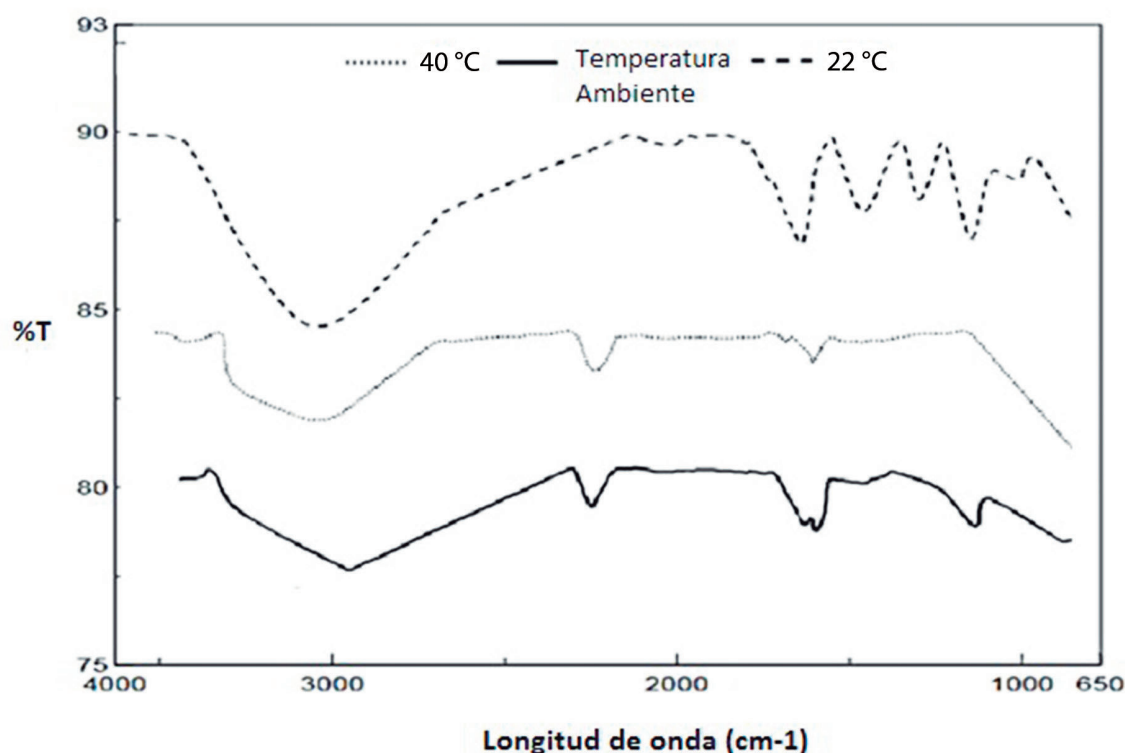


Figura 1. Espectros FTIR de muestras secas a 22 °C, 40 °C y temperatura ambiente
Fuente: elaboración propia.

Con referencia a los espectros UV/VIS, se evidenciaron máximos de absorción en el rango ultravioleta: 260 a 365 nm para los tres extractos etanólicos obtenidos a 22 °C, 40 °C y temperatura ambiente de secado de las hojas de *P. americana*. Por su parte, en la región del espectro visible solamente aparecieron pequeños picos a los 663 y 664 nm para los extractos etanólicos obtenidos a temperatura de 22 °C y 40 °C. De acuerdo con el análisis ultravioleta visible de los extractos, se observaron bandas de absorción máxima entre 200 y 300 nm, correspondientes a la banda benzoil o banda II característica para el anillo aromático A de flavonoides.

Por otra parte, el desplazamiento de las últimas bandas a longitud de onda mayor a 500 nm es característica para flavonoides del grupo de las antocianinas, en ese sentido, se comprobó la presencia de antocianinas además de otras sustancias fenólicas en la muestra; asimismo, los picos cercanos a los 663 nm pueden corresponder a compuestos de tipo cianina $(CH_3)_2N-(CH=CH)_n-CH=N^+(CH_3)_2$, que es un nombre no sistemático de una familia sintética de colorantes perteneciente al grupo polimetina. En cambio, los picos cercanos a 365 nm corresponden en alta probabilidad a merocianinas, lo que se pudo evidenciar en el extracto obtenido de las muestras con una temperatura de secado a 40 °C de las hojas *P. americana* (ver Figura 2) (Ren; Tian, 2007; Martínez-Cruz *et al.*, 2011).

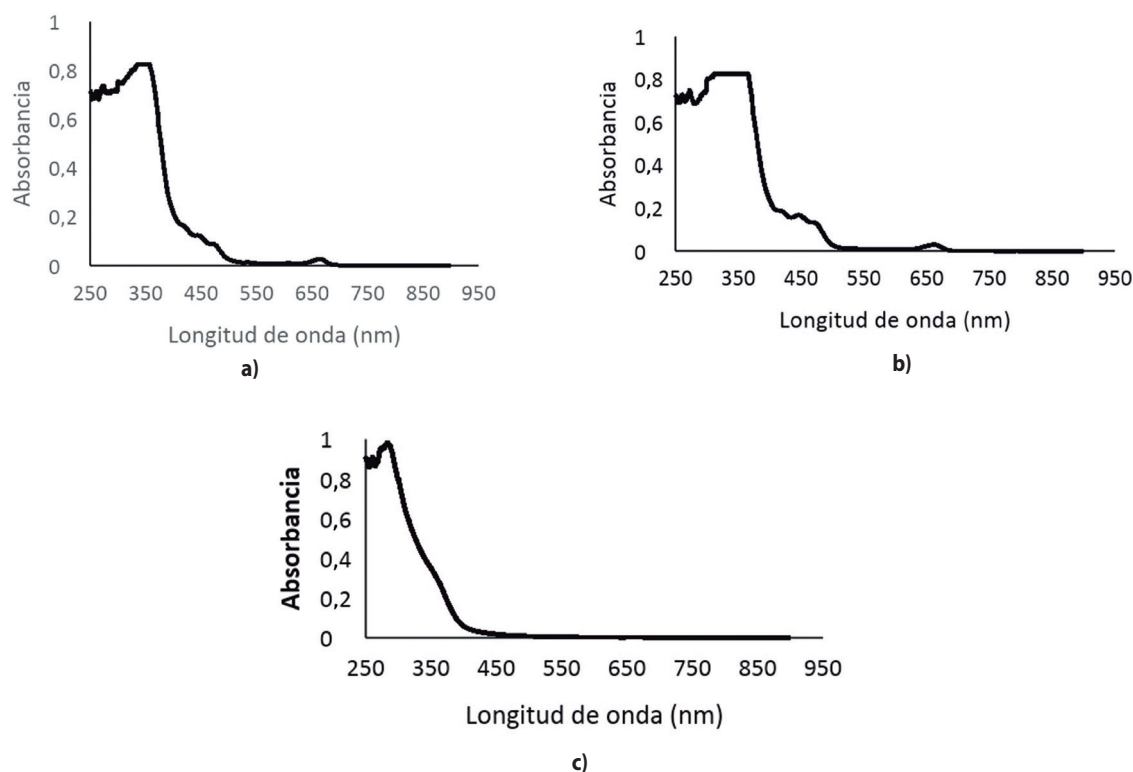


Figura 2. Espectros de absorción de extractos etanólicos obtenidos a diferentes temperaturas de secado de las hojas de *P. americana*:
a) 22 °C b) 40 °C c) Temperatura ambiente

Fuente: elaboración propia.

3.2. Screening fitoquímico

En los resultados obtenidos del *screening* fitoquímico se evidenció la presencia de flavonoides, saponinas, cumarinas y taninos; en cambio, en los extractos en hexano no se evidenció la presencia de metabolitos secundarios. Comparando con otros estudios de hojas de *Phytolacca dodecandra* perteneciente a la familia de *Phytolaccaceae*, estos revelaron la presencia de compuestos fenólicos, aunque en bajas concentraciones. Asimismo, evidenciaron la presencia de alcaloides y terpenoides; este último se mostró en altas concentraciones (ver Tabla 1) (Ogut; Lilechi; Mutai; Bii, 2012).

Tabla 1.
Análisis fitoquímico de las hojas de *Phytolacca americana*

Componente/prueba/solvente	Prueba	Extracto etanol	Extracto en hexano
Fenoles	Prueba de Cloruro férrico	-	-
Flavonoides	Shinoda	+	-
Saponinas	Espuma	+	-
Cumarinas	Reacción de Fluorescencia	+	-
Alcaloides	Reactivo de Mayer, Drangerdorft y Wagner	-	-
Taninos	Prueba con ferrocianuro de potasio	+	-

Nota: +, indica la presencia de metabolitos; -, indica la ausencia de metabolitos
Fuente: elaboración propia (Bitácora de laboratorio).

Respecto a los flavonoides evidenciados en los extractos etanólicos, estos pertenecen al grupo de los compuestos polifenólicos y son típicamente conocidos por promover la salud a causa de sus propiedades antioxidantes, antialérgicas, antiinflamatorias, antimicrobianas y anticancerosas; existen ampliamente en el reino vegetal y muestran una correlación positiva entre el aumento del consumo de flavonoides y reducción del riesgo cardiovascular y cáncer (Khanam *et al.*, 2015; Miranda- Da Gama; Guimarães; de Abreu; Armando-Junior, 2014; Qadir; Paul; Ganesh, 2015; Chigayo; Mojapelo; Mnyakeni-Moleele; Misihairabgwi, 2016). Asimismo, los taninos son flavonoides oligoméricos y poliméricos ampliamente distribuidos en vegetales y frutas, se le atribuyen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y en la prevención de aterosclerosis (Mamet; Ge; Zhang; Li, 2018). En cuanto a las saponinas, estas tienen en su estructura química, aglicona triterpeno o esteroide; es por eso que el consumo de saponinas incrementa la protección contra el riesgo de cáncer, disminuye el nivel de colesterol y glucosa en la sangre, además, se le atribuye propiedades antiinflamatorias, hipocolesterolémicas e inmunestimulantes. (Augustin; Kuzina; Andersen; Bak, 2011). Respecto a las cumarinas presentes en las hojas de *P. americana*, estas dan aroma a las plantas y tienen propiedades vitamínicas, disminuyen la permeabilidad capilar y aumentan la resistencia de las paredes de capilares (protegen la fragilidad capilar y actúan como tónico venoso), también se le atribuyen propiedades antibacteriales (Singh; Singh; Singh; Kaur, 2017).

Otros estudios realizados identificaron los siguientes compuestos en las hojas de *P. americana*: kaempferol 3-O-β-D-glucopyranoside, kaempferol 3-O-β-D-xylopyranosyl (1→2)- β-D-glucopyranoside, kaempferol 3-O-α-l-rhamnopyranosyl (1→2)- β-D-glucopyranoside, kaempferol 3-O-diglucoside y quercetina 3-O-glucosido (Bylka; Matlawska, 2001); esto puede ser como consecuencia de las diferentes ubicaciones geográficas en las que los minerales del suelo y los factores ambientales tienen una gran influencia sobre los contenidos fitoquímicos de la planta (Borokini; Ayodele, 2012).

3.3. Cromatografía de gases

Los compuestos volátiles de origen vegetal son producidos principalmente por diferentes rutas biosintéticas, entre las que se destaca la vía de los ácidos grasos/lipooxigenasa (Paré y Tumlinson, 1999), donde estos son sintetizados a partir del ácido linoleico y octadecanoico (identificados por cromatografía de masas). Por esta razón, es importante garantizar que la temperatura de secado no altere la naturaleza de estos compuestos garantizando su presencia en los extractos finales.

En la Tabla 2 se relacionan los compuestos identificados por la base de datos Nist-05 en los extractos en hexano de *P. americana*, el análisis cromatográfico realizado a los extractos etanólicos no arrojó resultados con tiempos de retención superiores a los 0.5 min que pudieran ser considerados como relevantes.

Tabla 2.
Posibles compuestos encontrados en el extracto en hexano de *P. americana*

Factor de identificación %	Nombre	Tiempo de retención (min)
8,46	9,9-dimetoxibicyclo[3.3.1]non ane-2,4-diona	2,44
3,88	9-Ácido octadecenoico (Z)-	1,529
83,40	9-Ácido octadecenoico (Z)-	0,740
4,64	10-metoxi-nb-alfa-metilcorynanteol (C ₂₁ H ₂₉ N ₂ O ₂)	4,508
0,39	Eritro-9,10-Dibromopentacosane (C ₂₅ H ₅₀ Br ₂)	4,891

Fuente: base de datos. The National Institute of Standards and Technology (NIST), licencia adquirida por la Universidad del Valle (2018).

Los ácidos grasos, como el ácido 9-ácido octadecenoico (Z) o ácido oleico son ácidos grasos monoinsaturados de la serie omega 9, su nombre IUPAC es ácido cis-9- octadecenoico, este compuesto se evidenció en los extractos en hexano de *P. americana* y su cromatograma (ver Figura 3).

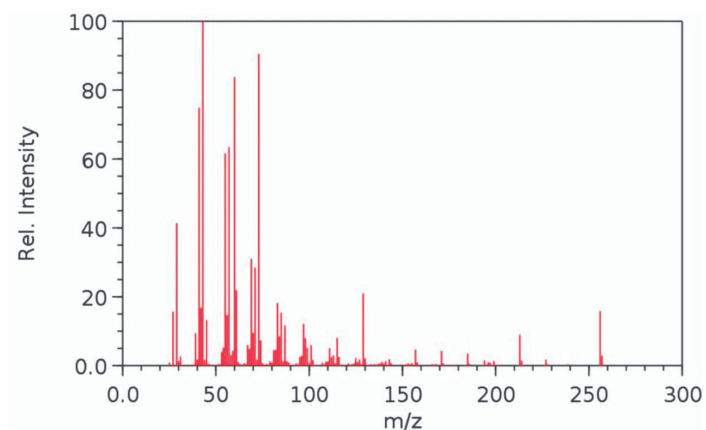


Figura 3. Espectro de masas para el ácido oleico
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4 se evidenció que el compuesto identificado presenta un grupo carboxilo en su estructura, este ácido se usa principalmente en la industria alimenticia por sus diversos beneficios a la salud.

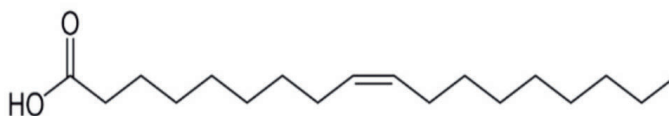


Figura 4. Estructura del ácido oleico
Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, se contempló la fragmentación en espectro de masas de algunos grupos funcionales que hacen parte de la composición y estructura molecular de los extractos, en donde se observaron iones moleculares con relaciones de carga masa (m/z) que no han sido aún publicados en la literatura. Algunas moléculas presentan arreglo McLafferty (ver Figuras 5, 6, 7, 8 y 9).

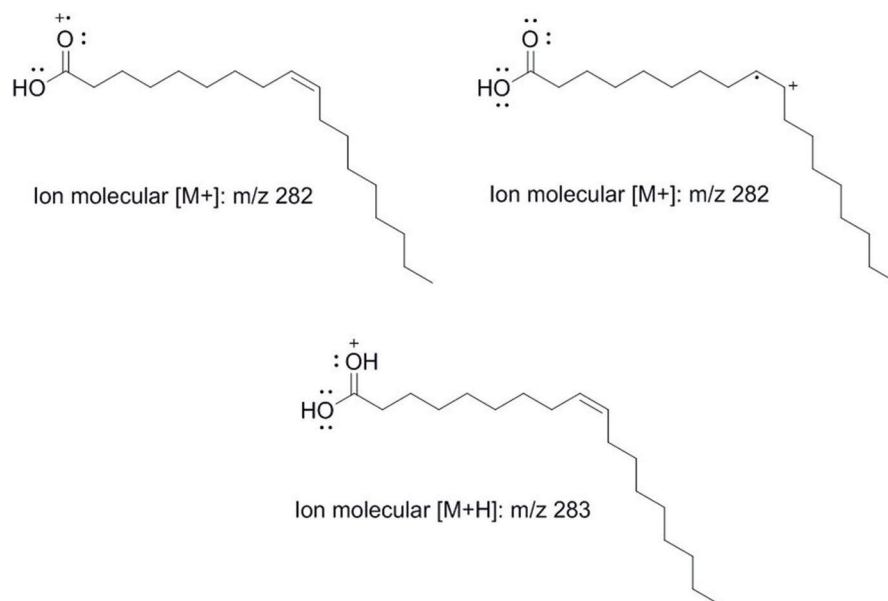


Figura 5. Posibles iones moleculares en el espectro de masas
Fuente: elaboración propia.

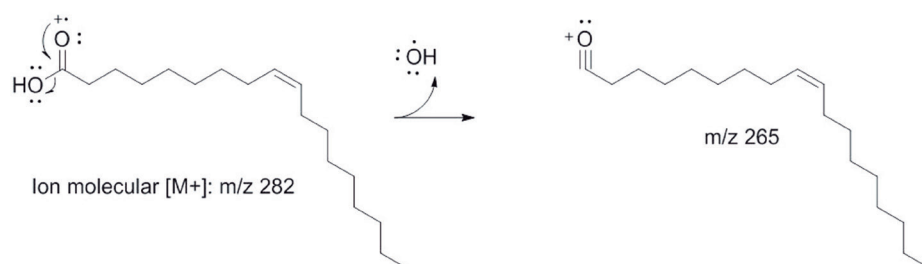


Figura 6. Pérdida de ·OH:
Fuente: elaboración propia.

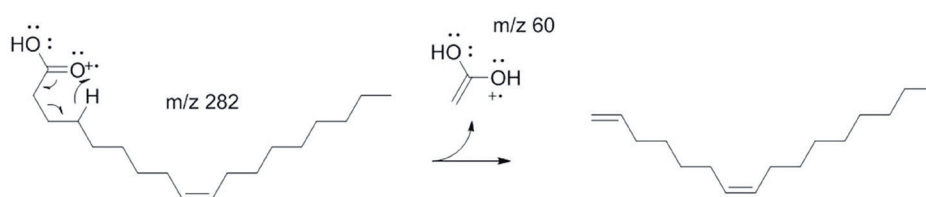


Figura 7. Arreglo de McLafferty
Fuente: elaboración propia.

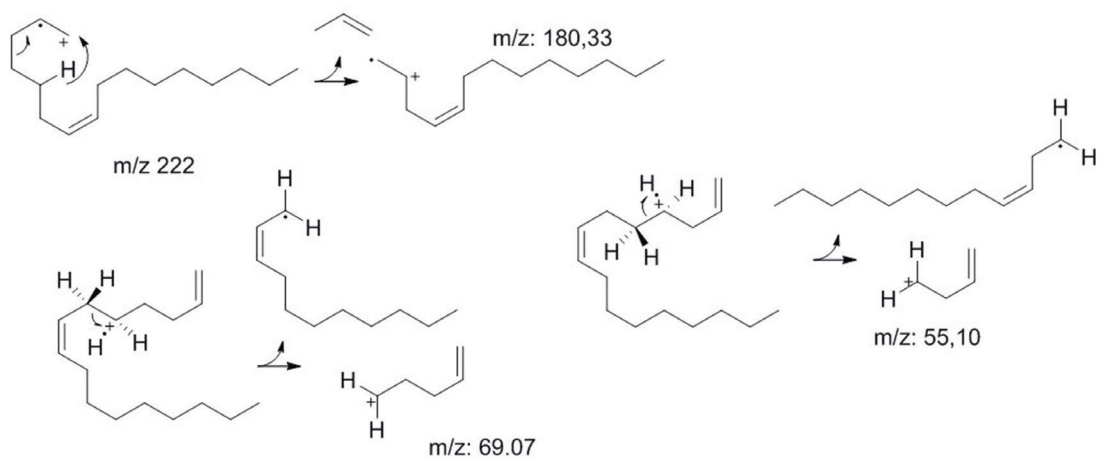


Figura 8. Generación de nuevos iones moleculares y rupturas en dobles enlaces
Fuente: elaboración propia.

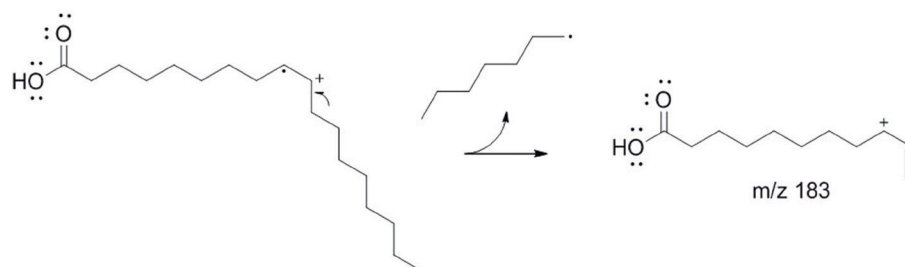


Figura 9. Ruptura en doble enlace
Fuente: elaboración propia.

Por consiguiente, el compuesto identificado con un grupo carboxilo en su estructura en los extractos de *P. americana* es de importancia agroindustrial, debido a que la mayoría de los ácidos grasos insaturados de origen biológico se derivan del ácido oleico, ácido linoleico y del ácido linolénico; estos ácidos son encontrados en biomasa y extractos naturales con características oleaginosas. Encontrarlos en estas especies se debe a que las plantas acumulan lípidos cuando el crecimiento se ve limitado, debido a la falta de nitrógeno o de otro tipo de nutrientes. Los compuestos derivados de los ácidos grasos como el colesterol, ergosterol y otros, son comunes encontrarlos en las células vegetativas y son catalogados como metabolitos, secundarios (Samson; de Boer, 1995).

De hecho, el ácido oleico participa en la síntesis de las rostaglandinas, en la generación de membrana, así como en otros procesos biológicos relacionados con la regeneración celular; el suplemento de ácidos grasos puede curar esos síntomas en la piel y estimular la epitelización (Salari; Bakhshi; Sharififar; Naseri; Almani, 2016). De igual forma, el consumo de ácido oleico promueve un buen funcionamiento del sistema nervioso y visual del ser humano (Teichmann; Dutta; Staffas; Jägerstad, 2007; Horst, 2012; Nouripour-Sisakht *et al.*, 2015; Cerqueira-Sales; Barcellos-Costa; Machado-Bueno; Aires-Ventura; Dummer Meira, 2016). Por consiguiente, es importante la identificación de estos compuestos con fines de explotación, ya que daría un valor agregado a la oferta de plantas como la *P. Americana*, abundantes en regiones campesinas dedicadas al agro como el departamento de Nariño.

3.4. Actividad antifúngica

Los ensayos antifúngicos preliminares se realizaron con cinco concentraciones (60, 120, 180, 240 y 300 mg/mL) de los extractos etanólicos de las hojas de *P. americana*, con ello se evidenciaron los diámetros de inhibición promedio con los que se pudo observar que respecto a la cepa *Aspergillus brasiliensis*, no hubo actividad antifúngica por parte de los extractos de *P. americana* hacia esta cepa comparado con el control positivo (47 mm), la *Aspergillus brasiliensis* es un hongo de la familia *Aspergillus* causante de una amplia gama de enfermedades en el ser humano, como aspergilosis invasiva o alérgica, aspergiloma, sinusitis, otomicosis, onicomicosis y queratitis (Nouripour-Sisakht *et al.*, 2015), por lo que se hubiese querido lograr un efecto de inhibición por parte de la planta de estudio.

Por otra parte, se evidenció que hay una mayor inhibición con respecto a las cepas *F. solani* y *C. albicans* a unas concentraciones de extracto de 240 y 300 mg/mL, respectivamente. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Peng *et al.*, (2005) en el hongo *F. Solani*, donde obtuvo un gran efecto de inhibición contra esta cepa y menciona que la acción antimicrobiana de las hojas de *P. americana* se debe posiblemente a la superficie hidrofóbica de estas y a la membrana plasmática que contiene la bicapa lipídica, con proteínas antimicrobianas que también se encuentran en la semilla y raíz de la planta.

Con respecto a la cepa *S. kudriavzevii*, familia de la *Saccharomyces cerevisiae*, que es un colonizador común de mucosas y que produce infecciones tanto superficiales como viscerales invasivas (Davicino *et al.*, 2007), también se observó un alto efecto de inhibición (13 ± 7 mm) a las más altas concentraciones del extracto de la planta evaluadas (ver Tabla 3).

Los resultados mencionados concuerdan con el estudio realizado por Shao *et al.*, (1999) que menciona que los mecanismos de defensa de las plantas como la *P. americana* se debe a la presencia de una amplia gama de péptidos o proteínas antimicrobianas y el interés particular es aislar estos componentes con fines terapéuticos; por ello aisló un péptido altamente básico con 38 residuos (aminoácidos) y tres puentes disulfuro denominado PAFP-s, a partir de las semillas de esta planta y comprobó a partir de este, un amplio espectro significativo de actividad antifúngica contra varios hongos, excepto hacia la *Escherichia coli*.

Tabla 3.
Actividad antifúngica de las hojas de *Phytolacca americana*

CEPA/Concentración mínima inhibitoria MIC (mg/mL)	Diámetro de inhibición (mm)					Control negativo	Control positivo tiabendazol (500 mg/mL)
	60	120	180	240	300	Etanol al 95%	
<i>Aspergillus brasiliensis</i> (ATCC 16404)	6 (N/A)	6 (N/A)	6 (N/A)	6 (N/A)	7 (N/A)	6 (N/A)	47
<i>Fusarium Solani</i> (ATCC 36031)	13	16	12	18	16	6 (N/A)	18
<i>Candida albicans</i> (ATCC 90028)	9 ±	7	18	16	19	6 (N/A)	21
<i>Saccharomyces kudriavzevii</i> (ATCC 260)	7	9	12	13	13	6 (N/A)	21

N/A: No actividad

Fuente: elaboración propia (Bitácora de laboratorio).

Por lo anterior, se puede afirmar que, comparado a otros estudios (bajas concentraciones de extractos), se debe tener en cuenta que se trabajó con extractos crudos que contienen metabolitos o impurezas sin actividad antifúngica. Con respecto al índice antimicrobiano, se evidenció un bajo índice, debido a la alta susceptibilidad de los hongos con respecto al control positivo, esto se corroboró con los valores de diámetros de inhibición de concentraciones de los extractos, como los valores de la cepa *F. Solani* cercanos con el control positivo (18 mm). En cuanto al control negativo en el que se encontraban los extractos crudos de la planta, se evidenció que el etanol no es el responsable del efecto inhibitorio contra las cepas evaluadas, pues no se obtuvieron diámetros de inhibición, por ello se le atribuye el efecto de inhibición directamente a los extractos (Pérez; Rojas; Chamorro; Pérez, 2011).

La actividad antifúngica de la planta se debe a la presencia de metabolitos secundarios como los flavonoides, tal como se comprobó tanto en la caracterización por UV /VIS como por el *screening* fitoquímico. La evaluación de la actividad antifúngica de la *P. americana* evidenció la presencia de flavonoides comparado con otros estudios relacionados con la especie de *Phytolaccaceae* que también obtuvieron resultados favorables con respecto a la actividad antimicrobiana de otras especies, lo que indica que la planta de estudio tiene potenciales agentes microbianos que sería muy importante aislarlos (Ogutu *et al.*, 2012). Además, se corroboró con la presencia de taninos que son metabolitos secundarios producidos naturalmente en hierbas medicinales y tradicionales, ricas en polifenoles, así mismo, esta actividad antifúngica puede derivarse de la expresión de sustancias con características polares, como las saponinas y bioflavonoides promotores de la acción anti-radicales libres sinérgica a la actividad biológica, que es impulsada por la maceración de la extracción etanólica de la planta (Cerqueira-Sales *et al.*, 2016).

Con respecto al análisis de varianza, este fue realizado para varias muestras, con la cepa *C. albicans*, el valor P de la prueba-F fue menor que 0,05 ($p \leq 0,0242$), lo que evidenció que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las cinco concentraciones evaluadas del extracto, el nivel de confianza alcanzado fue del 95 % por lo que se puede concluir que el extracto etanólico de las hojas de *P. americana* fue más efectivo en esta cepa, comparado con las demás cepas evaluadas. Esta especie como es la *Candida*, son hongos patógenos humanos que causan infecciones sistémicas y mucosas que pueden convertirse en graves infecciones que amenazan la vida con una mayor mortalidad entre pacientes inmunocomprometidos. En cuanto a la actividad antifúngica de la *P. americana* hacia *F. solani*, que es un hongo filamentoso que causa la eliminación de muchos cultivos en campos e invernaderos y, además, produce infecciones en los seres humanos como la peritonitis fúngica (Wang; Zheng; Xiang; Li; Yang, 2016; Mayr; Rasch; Schmid; Huber; Lahmer, 2017) sería una alternativa efectiva y sostenible a los fungicidas sintéticos en el control de hongos patógenos.

Los resultados del presente trabajo indicaron que la *P. americana* tiene propiedades antifúngicas. Esto explica el uso de esta planta en la medicina popular para el tratamiento de enfermedades cuyos síntomas pueden involucrar hongos, infecciones, entre otras, y subrayan la importancia de la fitoquímica en el descubrimiento de nuevos compuestos bioactivos para identificar los principios activos responsables de los efectos antifúngicos, con los beneficios adicionales de un medio ambiente seguro. Además, una contribución al rescate de esta planta en vía de extinción dándole aplicaciones en sectores farmacéuticos y agrícolas.

4. Conclusiones

Se evidencia la presencia de fitoquímicos tales como flavonoides, saponinas, cumarinas y taninos en los extractos etanólicos de las hojas de *P. americana*, esta información puede servir como fuente potencial en el uso de fármacos útiles en un futuro. En cuanto al análisis cromatográfico, se identificó la presencia de ácidos grasos esenciales de alto valor agregado como el ácido oleico, 9,9 – dimetoxibicyclo [3.3.1]non ane-2,4-diona, 10-metoxi-nb-alfa-metilcorynanteol ($C_{21}H_{29}N_2O_2$), eritro-9,10- Dibromopentacosane ($C_{25}H_{50}Br_2$) entre otros, con bajos tiempos de retención, con porcentajes inferiores al 1 %. Se determinó un mayor potencial antifúngico a partir de los extractos etanólicos contra las cepas *F. solani* y *C. albicans*, lo que impulsaría el uso de esta planta en el sector agrícola y farmacéutico. Se recomienda realizar pruebas experimentales con otro tipo de especies bacterianas y fúngicas para determinar una mayor eficacia microbiana de los extractos de la *P. americana*.

5. Referencias

- Andriani, Yosie; Ramli, Nadiah; Syamsumir, Desy; Kassim, Murni; Jaafar, Jasmin; Aziz, Nur; Marlina, Leni; Musa, Noor; Mohamad, Habsah (2015). Phytochemical analysis, antioxidant, antibacterial and cytotoxicity properties of keys and cores part of *Pandanus tectorius* fruits. *Arabian Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.003>
- Augustin, Jörg; Kuzina, Vera; Andersen, Sven; Bak, Søren (2011). Molecular activities, biosynthesis and evolution of triterpenoid saponins. *Phytochemistry*, 72(6), 435-457. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.01.015>
- Borokini, Israel; Ayodele, Abiodun (2012). Phytochemical screening of *Tacca leontopetaloides* (L.) Kuntze collected from four geographical locations in Nigeria. *International Journal of Modern Botany*, 2(4), 97-102.
- Bylka, Wiesława; Matlawska, Irena (2001). Flawonoids and free phenolic acids from *Phytolacca americana* L. leaves. *Acta Poloniae Pharmaceutica*, 58(1), 69-72.
- Cerqueira-Sales, Maria; Barcellos-Costa, Helber; Machado-Bueno, Patrícia; Aires-Ventura, José; Dummer Meira, Debora (2016). Antifungal activity of plant extracts with potential to control plant pathogens in pineapple. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 6(1), 26-31. <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2015.09.026>
- Chigayo, Kayini; Mojaelo, Paul; Mnyakeni-Moleele, Simon; Misihairabgwi, Jane (2016). Phytochemical and antioxidant properties of different solvent extracts of *Kirkia wilmsii* tubers. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 6(12), 1037-1043. <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2016.10.004>
- Davicino, Roberto; Mattar, María; Casali, Yolanda; Correa, Silvia; Pettenati, Elisa; Micalizzi, Blas (2007). Actividad antifúngica de extractos de plantas usadas en medicina popular en Argentina. *Revista Peruana de Biología*, 14(2), 247-252. <https://doi.org/10.15381/rpb.v14i2.1784>

- Dudareva, N.; Negre, F. (2005). Practical applications of research into the regulation of plant volatile emission. *Current Opinion in Plant Biology*, 8(1), 113-118.
<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2004.11.007>
- Hernández-Niño, Renné. (2010). *Exploración del efecto de altas diluciones sucusionadas (medicamento homeopático) de Phytolacca americana sobre linfocitos humanos. Fase 2* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/3083/>
- Hinojosa-Dávalos, Joel; Gutiérrez-Lomelí, Melesio; Siller-López, Fernando; Rodríguez-Sahagún, Araceli; Morales-Del Río, Juan; Guerrero-Medina, Pedro; Del Toro Sánchez, Carmen (2013). Screening fitoquímico y capacidad antiinflamatoria de hojas de *Tithonia tubaeformis*. *Biotecnia*, 15(2), 53-60.
<https://doi.org/10.18633/bt.v15i2.150>
- Horst, Heros (2012). *Investigação fitoquímica e biológica da espécie: Esenbeckia leiocarpa Engl* (tesis doctoral). Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil. Recuperado de <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/100572>
- Iqbal, Erum; Salim, Kamariah; Lim, Linda (2015). Phytochemical screening, total phenolics and antioxidant activities of bark and leaf extracts of *Goniolobus velutinus* (Airy Shaw) from Brunei Darussalam. *Journal of King Saud University-Science*, 27(3), 224-232.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jksus.2015.02.003>
- Irvin, James (1975). Purification and partial characterization of the antiviral protein from *Phytolacca americana* which inhibits eukaryotic protein synthesis. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 169(2), 522-528.
[https://doi.org/10.1016/0003-9861\(75\)90195-2](https://doi.org/10.1016/0003-9861(75)90195-2)
- Iwakiri, Tomoya; Mase, Shogo; Murakami, Tomonori; Matsumoto, Masahiro; Hamada, Hiroki; Nakayama, Toru; Ozaki, Shin-ichi (2013). Glucosylation of hydroxyflavones by glucosyltransferases from *Phytolacca americana*. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 90, 61-65.
<https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2013.01.016>
- Khanam, Zakia; Wen, Chew; Bhat, Irshad (2015). Phytochemical screening and antimicrobial activity of root and stem extracts of wild *Eurycoma longifolia* Jack (Tongkat Ali). *Journal of King Saud University-Science*, 27(1), 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2014.04.006>
- Kim, Sung-Jin; Cho, Ah; Han, Jaejoon (2013). Antioxidant and antimicrobial activities of leafy green vegetable extracts and their applications to meat product preservation. *Food Control*, 29(1), 112-120.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.05.060>
- Lady Bird Johnson Wildflower Center (Citado el 11 de jul 2017). *Phytolacca americana*. Recuperado de http://www.wildflower.org/plants/result.php?id_plant=PHAM4.
- Mamet, Torkun; Ge, Zhen-zhen; Zhang, Ying; Li, Chun-mei (2018). Interactions between highly galloylated persimmon tannins and pectins. *International Journal of Biological Macromolecules*, 106, 410-417.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.039>
- Martínez, Guillermo (2006). *Formulation pharmaceutique d'herbes medicinales a base d'extraits de phytolacca americana, alnus acuminata et goudron de houille pour le traitement et la guerison du psoriasis*. Patente No. WO2006014100, México.
- Martínez-Cruz, Nieves; Arévalo-Niño, Katiushka; Verde-Star, María; Rivas-Morales, Catalina; Oranday-Cárdenas, Azucena; Núñez-González, María; Morales-Rubio, María (2011). Antocianinas y actividad

- anti radicales libres de *Rubus adenotrichus* Schldl (zarzamora). *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*, 42(4), 66-71.
- Mayr, U.; Rasch, S.; Schmid, R. M.; Huber, W.; Lahmer, T. (2017). First description of spontaneous fungal peritonitis caused by *Fusarium solani* in a critically ill patient with liver cirrhosis. *New microbes and new infections*, 20, 16-17. <https://doi.org/10.1016/j.nmni.2017.08.003>
- Miranda- Da Gama, Robson; Guimaraes, Marcelo; de Abreu, Luiz; Armando-Junior, José (2014). Phytochemical screening and antioxidant activity of ethanol extract of *Tithonia diversifolia* (Hemsl) A. Gray dry flowers. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 4(9), 740-742. <https://doi.org/10.12980/APJTB.4.2014APJTB-2014-0055>
- Natural Remedies (citado el 14 junio de 2017). *Pokeweed's Humble Beginnings*. Recuperado de <https://www.naturalremedies.org/pokeweed/>
- Navarro-García, V.; Gonzalez, A.; Fuentes, M.; Aviles, M.; Rios, M. Y.; Zepeda, G.; Rojas, M. G. (2003). Antifungal activities of nine traditional Mexican medicinal plants. *Journal of Ethnopharmacology*, 87(1), 85-88. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(03\)00114-4](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(03)00114-4)
- Nouripour-Sisakht, S.; Mirhendi, H.; Shidfar, M. R.; Ahmadi, B.; Rezaei-Matehkolaei, A.; Geramishoar, M.; Zarei, F.; Jalalizand, N. (2015). *Aspergillus* species as emerging causative agents of onychomycosis. *Journal de Mycologie Medicale*, 25(2), 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.mycmed.2014.12.001>
- Ogut, A. I.; Lilechi, D. B.; Mutai, C.; Bii, C. (2012). Phytochemical analysis and antimicrobial activity of *Phytolacca dodecandra*, *Cucumis aculeatus* and *Erythrina excelsa*. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(2), 692-704. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i2.13>
- Paré, P.; Tumlinson, J. (1999). Plant volatiles as a defense against insect herbivores. *Plant Physiology*, 121(2), 325-332. <https://doi.org/10.1104/pp.121.2.325>
- Parveen, Mehtab; Ghalib, Raza; Khanam, Zakia; Mehdi, Sayed; Ali, Mohammed (2010). A novel antimicrobial agent from the leaves of *Peltophorum vogelianum* (Benth.). *Natural Product Research*, 24(13), 1268-1273. <https://doi.org/10.1080/14786410903387688>
- Pérez, Alexander; Rojas, Johanna; Chamorro, Leonardo; Pérez, Katy (2011). Evaluación de la actividad antifúngica de *Melia azederach* sobre aislados de *Colletotrichum* spp. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA*, 3(2), 309-320. <https://doi.org/10.24188/recia.v3.n2.2011.400>
- Peng, C.; Dong, C.; Hou, Q.; Xu, C.; Zhao, J. (2005). The hydrophobic surface of PaAMP from pokeweed seeds is essential to its interaction with fungal membrane lipids and the antifungal activity. *FEBS letters*, 579(11), 2445-2450. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2005.03.046>
- Qadir, Umer; Paul, V. I.; Ganesh, P. (2015). Preliminary phytochemical screening and in vitro antibacterial activity of *Anamirta cocculus* (Linn.) seeds. *Journal of King Saud University-Science*, 27(2), 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2014.04.004>
- Quiroga, Emma; Sampietro, Antonio; Vattuone, Marta (2001). Screening antifungal activities of selected medicinal plants. *Journal of Ethnopharmacology*, 74(1), 89-96.

- Ren, Jiaqiang; Tian, He (2007). Thermally stable merocyanine form of photochromic spiropyran with aluminum ion as a reversible photo-driven sensor in aqueous solution. *Sensors*, 7(12), 3166-3178. <https://doi.org/10.3390/s7123166>
- Rojas-Quintero, Juan (2011). *Exploración del efecto de altas diluciones sucusionadas (medicamento homeopático) de Phytolacca americana sobre linfocitos humanos. Fase III* (tesis de maestría). Universidad Nacional, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/5316/>
- Rondón, María; Moncayo, Shirley; Cornejo, Xavier; Santos, Jaime; Villalta, David; Sigüencia, Rosa; Duche, Jodiea (2018). Preliminary phytochemical screening, total phenolic content and antibacterial activity of thirteen native species from Guayas province Ecuador. *Journal of King Saud University-Science*, 30(4), 500-505. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.03.009>
- Salari, S.; Bakhshi, T.; Sharififar, F.; Naseri, A.; Almani, P. (2016). Evaluation of antifungal activity of standardized extract of *Salvia rhytidea* Benth. (Lamiaceae) against various *Candida* isolates. *Journal de Mycologie Medicale*, 26(4), 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.mycmed.2016.06.003>
- Samson, Robert; de Boer, Enne (1995). *Introduction to Food-borne Fungi*. Wageningen, Netherlands: Baarn: Centraalbureau voor Schimmelfcultures. (pp. 33-112).
- Sanabria, A. (1983). *Análisis Fitoquímico Preliminar. Metodología y su aplicación en la evaluación de 40 plantas de la familia Compositae*. Bogotá, D.C: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Farmacia.
- Sanabria, Antonio; Mantilla, José (1986). Actividad antifúngica de plantas superiores colombianas. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 15(1), 16-22.
- Shao, F.; Hu, Z.; Xiong, Y.; Huang, Q.; Wang, C.; Zhu, R.; H.; Wang, D. (1999). A new antifungal peptide from the seeds of *Phytolacca americana*: characterization, amino acid sequence and cDNA cloning. *Biochimica Biophysica Acta* (1430(2), 262-268. [https://doi.org/10.1016/S0167-4838\(99\)00013-8](https://doi.org/10.1016/S0167-4838(99)00013-8)
- Sharapin, Nikolai (2000). *Fundamentos de tecnología de productos fitoterapéuticos*. Bogotá, Colombia: Convenio Andrés Bello. Subprograma X CYTED.
- Singh, Balwinder; Singh, Jatinder; Singh, Narpinder; Kaur, Amritpal (2017). Saponins in pulses and their health promoting activities: a review. *Food Chemistry*, 233, 540-549. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.161>
- Skoog, Douglas Arvid (1998). *Principios de análisis instrumental*, 5º ed.; Madrid, España: Ed. McGraw-Hill, 409- 461.
- Teichmann, Anja; Dutta, Paresh; Staffas, Anders; Jägerstad, Margaretha (2007). Sterol and vitamin D2 concentrations in cultivated and wild grown mushrooms: effects of UV irradiation. *LWT-Food Science and Technology*, 40(5), 815-822. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.04.003>
- Treviño, J.; Rodríguez, R.; Verde, M.; Morales, M.; Garza, R.; Rivas, C.; Oranday, A (2012). Actividad antifúngica de *Stenocereus pruinosus* y *Echinocereus stramineus*. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 43(1), 42-48.
- Taylor; David (citado el 4 de agosto de 2017). *USDA Forest Service (United States Department of Agriculture Forest Service): Plant of the Week. American Pokeweed (Phytolacca americana L.)*. Recuperado de https://www.fs.fed.us/wildflowers/plant-of-the-week/phytolacca_americana.shtml

- Wang, Shuzhen; Zheng, Yongliang; Xiang, Fu; Li, Shiming; Yang, Guliang (2016). Antifungal activity of *Momordica charantia* seed extracts toward the pathogenic fungus *Fusarium solani* L. *Journal of Food and Drug Analysis*, 24(4), 881-887. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.03.006>
- Yang, Wei-Hsiung; Wiczorck, Maciej; Allen, Matt; Nett, Terry (2003). Cytotoxic activity of gonadotropin- releasing hormone (GnRH)-pokeweed antiviral protein conjugates in cell lines expressing GnRH receptors. *Endocrinology*, 144(4), 1456-1463. Recuperado de <https://doi.org/10.1210/en.2002-220917>

Proceso metodológico para el análisis comparativo de validadores automáticos de accesibilidad Web

Methological process for the comparative analysis of automatic Web accessibility validators

José Montes-Gil¹
Luis Londoño-Rojas²
Valentina Tabares-Morales³

¹ Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Correo electrónico: joamontesgi@unal.edu.co; orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7117-3051>

² Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Correo electrónico: lfondonor@unal.edu.co; orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9580-3898>

³ Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Correo electrónico: vtabaresm@unal.edu.co; orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8078-8525>

Recibido: 15-11-2019 Aceptado: 06-08-2019

Cómo citar: Montes-Gil, José; Londoño-Rojas, Luis; Tabares-Morales, Valentina (2019). Proceso metodológico para el análisis comparativo de validadores automáticos de accesibilidad web. *Informador Técnico*, 84(1), 35-47. <https://doi.org/10.23850/22565035.2303>

Resumen

La accesibilidad web es aquella característica que permite que cualquier persona sin importar sus condiciones pueda acceder a los contenidos de los sitios web. El uso de validadores automáticos permite realizar un primer análisis acerca del nivel de accesibilidad de un sitio web. Sin embargo, la selección de estas herramientas tiende a no ser trivial, debido a las diferencias técnicas que presenta cada validador. El objetivo de este trabajo fue realizar un análisis comparativo entre validadores automáticos de accesibilidad, buscando establecer criterios de selección a la hora de elegir un validador para realizar una evaluación de accesibilidad. Se propuso una metodología basada en tres etapas que permitieron seleccionar 14 validadores que fueron analizados bajo diferentes criterios. Además, permitió concluir que ninguno de los validadores analizados cumple con todas las características, por lo que no sería suficiente seleccionar solo uno para realizar un proceso de evaluación de accesibilidad. Por lo tanto, este proceso metodológico se constituye como una herramienta de gran utilidad para la selección de validadores de accesibilidad.

Palabras clave: validadores de accesibilidad; validadores automáticos; accesibilidad; herramientas de evaluación de accesibilidad web; evaluación automática.

Abstract

Web accessibility is that feature that allows anyone, regardless of their conditions, to access the contents of websites. The use of automatic validators allows a first analysis to be made about the level of accessibility of a website. However, the selection of these tools tends not to be trivial due to the technical differences presented by each validator. The objective of this work was to carry out a comparative analysis between automatic accessibility validators, seeking to establish selection criteria when choosing a validator to carry out an accessibility evaluation. A methodology was proposed based on three stages that allowed the selection of 14 validators that were analyzed under different criteria. In addition, it allowed to conclude that none of the analyzed validators fulfills all the characteristics, reason why it would not be enough to select only one to carry out an accessibility evaluation process. Therefore, this methodological process constitutes a very useful tool for the selection of accessibility validators.

Keywords: accessibility validators; automatic validators; accessibility; web accessibility evaluation tools; automatic evaluation.

1. Introducción

Con el crecimiento continuo de la cantidad de sitios web que se encuentran en Internet, es importante contar con herramientas que permitan verificar si estos sitios cumplen pautas de accesibilidad web que permitan el acceso a todas las personas (Shawn-Lawton, 2005), las cuales están definidas dentro de las Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) establecidas por el consorcio internacional de generación de recomendaciones y estándares World Wide Web Consortium (W3C) y en la Sección 508 que hace parte de la Ley de Rehabilitación de 1973 en Estados Unidos. Por esta razón, son creados los validadores de accesibilidad web como herramientas con las que disponen los desarrolladores, diseñadores, expertos y usuarios para realizar la evaluación de accesibilidad automática de un sitio web.

Actualmente existe una gran cantidad de validadores de accesibilidad en la web, de los cuales 128 son herramientas que cuentan con el aval del Web Accessibility Initiative (WAI). Sin embargo, los validadores de accesibilidad automáticos presentan diferentes problemas; uno de ellos es que evalúan una pequeña proporción de los criterios definidos en los estándares (Abuaddous; Zolisham-Jali; Basir, 2016). Otro problema es la forma como se presentan los resultados que puede ser confusa para el usuario, tal como lo evidenciaron Brajnik; Vigo; Yesilada; Harper (2016) cuyo experimento consistió en evaluar de forma individual y en grupos el nivel de accesibilidad de varios sitios web, concluyendo que la interpretación de los resultados es mejor cuando varios usuarios cooperan, debido al nivel de dificultad que puede llegar a tener este proceso.

Con base en lo anterior, y teniendo en cuenta el trabajo de Akram y Sulaiman (2017), quienes realizaron una revisión de artículos para evaluar la accesibilidad en diferentes sitios web a nivel mundial se demostró que 87 % de estos documentos usan herramientas automáticas para la evaluación de accesibilidad y se identifica como problemática la selección de validadores de accesibilidad, de acuerdo a la forma como son presentados los resultados.

Para el presente trabajo se aplica un proceso sistemático de evaluación y comparación de validadores de accesibilidad web enfocado en el análisis de cómo se entregan y visualizan los resultados de las evaluaciones tanto en los validadores que comúnmente son utilizados en la literatura como en los validadores emergentes de los últimos dos años.

Los resultados de este trabajo pueden servir como herramienta de apoyo en la selección de los validadores automáticos de accesibilidad web tanto para los expertos evaluadores de accesibilidad como para desarrolladores, diseñadores e instituciones que deseen determinar el nivel de accesibilidad de sus sitios web.

2. Marco teórico

2.1 Accesibilidad web

La accesibilidad es comprendida como el conjunto de características que permiten que una persona independientemente de sus condiciones físicas, cognitivas o psicológicas, pueda acceder fácilmente a un producto o servicio. Por lo tanto, accesibilidad web se refiere a las características con las que cuentan los sitios web para permitir el acceso a cualquier persona sin importar sus condiciones (Shawn-Lawton, 2005).

Según el W3C, la accesibilidad web implica que cualquier persona sin importar sus condiciones, pueda percibir, comprender, navegar e interactuar con la web (Ismailova; Kimsanova, 2017). Por su parte, la Sección 508 define accesibilidad como el grado en que un producto, dispositivo, servicio o entorno está disponible para la mayor cantidad de personas posible (Krepp, 2014).

2.2 Estándares de accesibilidad web

Los estándares de accesibilidad son las normas, guías y pautas creadas por entidades gubernamentales o iniciativas de consorcios, con el fin de dar lineamientos de cómo se debe construir un sitio web para que este pueda ser accedido por la mayor cantidad de personas posibles, de tal forma que no se excluya ningún tipo de usuario por tener algún tipo de discapacidad (Varela *et al.*, 2012). A continuación, son presentados algunos estándares internacionales e iniciativas de accesibilidad web.

- **Accessible Rich Internet Applications (ARIA):** es un proyecto de la iniciativa Web Accessibility Initiative (WAI) de la W3C que tiene como fin la mejora de la accesibilidad de los elementos dinámicos de las interfaces desarrolladas en AJAX, HTML, Javascript y otras tecnologías (Watanabe; Fortes; Dias, 2017).

- **Web Content Accessibility Guidelines (WCAG):** son las guías que el W3C diseñó para la creación de sitios web accesibles. En la actualidad, se encuentra en la versión 2.1, la cual es la prueba beta de la versión 3.0 (Alonso-Virgós; Rodríguez-Baena; Pascual-Espada; González-Crespo, 2018; Kirkpatrick; Connor; Campbell; Cooper, 2018).

- **Sección 508:** es la norma de Estados Unidos en la que se define que todos los productos deben cumplir con requerimientos funcionales que permitan el acceso a cualquier persona sin importar sus condiciones, además, incluye las pautas que se deben tener en cuenta al momento de crear productos accesibles, entre ellos páginas web (Jaeger, 2004; Krepp, 2014; United States Access Board, 2000).

- **Authoring Tool Accessibility Guidelines (ATAG) y User Agent Accessibility Guidelines (UAAG):** son dos guías que la W3C creó como soporte a las WCAG respecto a las tecnologías emergentes, como lo son los sistemas multiagentes y las herramientas de autor (Agüero; Perea, 2009; Richards; Spellman; Treviranus, 2015; Spellman; Allan; Shawn-Lawton, 2016).

2.3 Evaluación de accesibilidad

La evaluación de accesibilidad consiste en la validación de algunas características de un sitio web con base en un estándar de accesibilidad. Las evaluaciones de accesibilidad tienen dos enfoques; el primero es la evaluación manual, realizada por un usuario experto en el tema de accesibilidad y utiliza como herramienta de validación un instrumento con una serie de criterios definidos para revisar si se cumplen o no en el sitio web. El segundo enfoque es la evaluación automática, la cual puede ser aplicada por cualquier usuario, ya que para realizarla se utiliza como herramienta uno o varios validadores de accesibilidad web, los cuales, por medio de la dirección del sitio web acceden a él y con base en las normas de accesibilidad, evalúan el código de la página.

Actualmente, la mayor parte de los trabajos que se encuentran en la literatura sobre evaluación de accesibilidad, se centran en sitios web gubernamentales (Ismailova; Kimsanova, 2017; King; Youngblood, 2016; Power, Pimenta-Freire; Petrie, 2009) e instituciones universitarias (Akram; Sulaiman, 2017; Ismailova; Inal, 2018; Ismailova; Kimsanova, 2017; Kurt, 2017; Laufer-Nir; Rimmerman, 2018). Esto tiene mucho sentido, ya que corresponde a las instituciones que deben ser pioneras en la construcción de sitios web accesibles, teniendo en cuenta que son portales a los cuales accede una gran cantidad de personas con diferentes características.

2.4 Validadores de accesibilidad web

Como se mencionó anteriormente, los validadores de accesibilidad web son herramientas que permiten realizar evaluación de accesibilidad de forma automática. En la actualidad existe una gran cantidad de validadores de accesibilidad que pueden ser de tipo web, aplicaciones de escritorio o extensiones de navegador. Algunos de estos validadores se enfocan más en la evaluación de la accesibilidad en cuanto a contrastes de la página, otros en el diseño responsivo del sitio web en diferentes tipos de dispositivos y, por lo general, la mayor parte de los validadores evalúan los criterios de estándares de accesibilidad

como las WCAG y la Sección 508, aunque algunos nuevos validadores evalúan con base en adaptaciones de los criterios de las WCAG a necesidades específicas.

3. Trabajos relacionados

Se realizó una búsqueda de trabajos relacionados a la comparación de validadores de accesibilidad web y metodologías de evaluación de validadores de accesibilidad.

López-Zambrano, Moreira-Pico; Alava-Cagua (2018) presentaron un modelo metodológico para valorar y clasificar las herramientas automáticas de evaluación de accesibilidad web. Dentro del caso de estudio de este trabajo se compararon los validadores de accesibilidad TAW, Analizador Web Ecuatoriano, Functional Accessibility Evaluator, Achecker, Ainspector, Access Monitor, Examiner, Vamolá, Tingtun Accessibility Checker, aXe, Total Validator, SortSite, Tenon Wave, Cynthia Says, WCAG Contrast Checker y Juicio Studio Toolbar, con base en los tres niveles de conformidad (A, AA, AAA) y los cuatro principios de las WCAG (operable, robusto, comprensible y perceptible), obteniendo como resultado varios cuadros comparativos con los mejores cinco validadores, de acuerdo a los niveles de conformidad. Se concluye que la evaluación automática de accesibilidad debe ser complementada con la evaluación manual, además, se recomienda utilizar metodologías de evaluación de validadores de accesibilidad basadas en las normas definidas por la W3C, para determinar cuál validador se debe usar en cada caso específico de evaluación de accesibilidad.

En el trabajo de Ismail, Kuppusamy y Nengroo (2018) se realizó la evaluación de accesibilidad con múltiples herramientas de los sitios web de los departamentos gubernamentales. Antes de empezar esta evaluación, se elaboró un análisis comparativo de los validadores automáticos de accesibilidad que se usarían (Achecker, Cynthia Says, Tenon, WAVE, Mauve, y Hera), utilizando como mecanismo de comparación de guías, chequeos automáticos, servicios en línea, accesibilidad chequeada por parámetro, API, extensión de navegador, idioma, formatos soportados, testeo por niveles (A, AA, AAA), testeo por prioridades (P1, P2, P3), reportes de la revisión de accesibilidad, formato de los reportes, licencia de software y asistencia para la generación de reporte, obteniendo dentro de las conclusiones que cada validador detecta diferentes características de accesibilidad, de manera que, para tener una mejor evaluación, debe utilizarse más de un validador.

Por su parte, Kaur y Dani (2017) llevaron a cabo el análisis comparativo de los validadores automáticos de accesibilidad web para móviles MobileOK Checker, TAW, EvalAccess Mobile y MobiReady. La comparación de estos se hace con base en tres parámetros, a saber; corrección, integridad y cobertura. Como resultado se obtuvo que los mejores validadores para evaluación automática de accesibilidad en dispositivos móviles son EvalAccess y MobileOK.

En la investigación de Al-Ahmad; Ahmaro; Mustafa (2015) se hizo un análisis comparativo de los validadores automáticos de accesibilidad web WAVE, ADesigner, A-Prompt, Web Accessibility Inspector y ATRC Accessibility Checker. En este estudio se realizaron unas pruebas a cada herramienta por cada criterio y se concluyó que ninguno de los validadores evalúa todas las pautas de accesibilidad definidas por la W3C, por lo que sugieren utilizar más de un validador para la evaluación automática de accesibilidad y aplicar evaluación manual de accesibilidad para garantizar la evaluación de todos los criterios de las normas de accesibilidad.

Pacheco, Amorim; Barbosa; Ferreira (2017) realizaron un análisis comparativo de herramientas de evaluación de accesibilidad, para valorar los validadores de accesibilidad AccessMonitor, ASES y TAW. Dentro de las conclusiones de este trabajo los autores sugieren el uso de más de un validador de accesibilidad para garantizar una mejor evaluación y también mencionan que para este caso en particular, el validador AccessMonitor presenta tanto falsos negativos como falsos positivos en los resultados.

Martín, Amado-Salvatierra; Hilera (2016) efectuaron la evaluación de accesibilidad de plataformas MOOC utilizando los validadores Examiner, Functional Accessibility Evaluator y Tingtun, en donde obtuvieron como resultado un ranking de accesibilidad de estos ocho MOOCs, recomendando el uso de los validadores de accesibilidad usados en el estudio.

Por otro lado, Al-Khalifa; Baazeem; Alamer (2017) llevaron a cabo la revisión de accesibilidad de los portales web del Gobierno de Arabia Saudita con el de generar conciencia respecto a la accesibilidad de los servicios e-government, así como validar si las nuevas políticas para mejorar la accesibilidad de estos sitios han sido efectivos o no. Para hacer esto se utilizaron como herramientas los validadores Achecker, Total Validator y WAVE y concluyeron que sí se ha mejorado considerablemente la accesibilidad de estos portales en los últimos años.

En el trabajo de Akram y Sulaiman (2017) se realizó una revisión sistemática de literatura para determinar los problemas de accesibilidad web en los portales de universidades y del Gobierno de Arabia Saudita para personas en situación de discapacidad. Dentro de los hallazgos de este trabajo se destaca que, del resumen de estudios de investigación existentes de accesibilidad web que realizan, el 87 % de los artículos revisados usan herramientas de evaluación automática de accesibilidad web y el validador de accesibilidad más usado es TAW, seguido de Achecker y EvalAccess.

4. Metodología

Con el objetivo de realizar un análisis comparativo de validadores de accesibilidad, se planteó una metodología integrada por tres etapas, las cuales se describen a continuación:

Etapla 1: en esta etapa se realizó una selección inicial de 21 validadores de accesibilidad, después de realizar la revisión de literatura, teniendo en cuenta solo aquellos que aparecen por lo menos una vez referenciados en la literatura consultada. A esos validadores seleccionados se les analizaron dos criterios básicos:

- **Tipo de aplicación:** este criterio permitió determinar si el validador es una herramienta web, de escritorio y/o extensión de navegador.

- **Licencia:** este criterio permitió identificar si el validador era gratuito o tenía algún costo su uso.

Etapla 2: se realizó la selección de los validadores que cumplieron como criterio ser aplicaciones web y de licencia gratuita, teniendo en cuenta la clasificación hecha en la etapa 1. También se realizó la revisión de disponibilidad de cada uno de los validadores seleccionados y su descripción.

Etapla 3: una vez descritos los validadores, se realizó la comparación de los validadores, de acuerdo a los criterios de evaluación que se presentan a continuación:

- **Estándares:** se identificó cuáles son los estándares bajos, con los cuales el validador realizó el análisis de accesibilidad.

- **Categorías de evaluación:** se analizaron los parámetros de clasificación de los resultados obtenidos por el validador, estas clasificaciones podían ser propias de la herramienta o definidas con base en los principios de las WCAG u otros estándares.

- **Medidas de evaluación:** se observó si los resultados de la evaluación de accesibilidad obtenida por el validador se mostraban en forma numérica y/o porcentual.

- **Cómo se visualizan los resultados:** se observó la forma como el validador presenta los resultados. Se identificó si lo hace de forma gráfica, si se listaron los criterios de las normas, si se presentó el código fuente, si se ubicaron los errores en la interfaz, si se analizó la cantidad de elementos frente a cantidad de elementos aprobados o si se indicó cómo corregir el error.

- **Descarga de resultados:** se determinó si los resultados de la evaluación de accesibilidad pueden ser descargados.

- **Cantidad de citas:** asociado con el proceso de análisis de las características de los validadores de accesibilidad, se realizó un proceso de revisión sistemática de literatura donde se seleccionaron artículos científicos que responden a

palabras claves relacionadas con evaluación de accesibilidad. Además, se realizaron búsquedas con el nombre de cada uno de los validadores seleccionados. Finalmente, se estableció la cantidad de citas que han tenido en publicaciones científicas.

5. Resultados y discusión

Esta sección presenta los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta, con su respectivo análisis. Al aplicar la primera etapa, fueron seleccionados 21 validadores de accesibilidad después de analizar los 128 disponibles a través del sitio web del W3C. Como se mencionó, la selección de estos validadores se hizo teniendo en cuenta su aparición en literatura especializada donde se realicen evaluaciones de accesibilidad.

Los validadores seleccionados y su descripción respecto al tipo de aplicación y a su licenciamiento se presentan en la Tabla 1.

Como resultado de la segunda etapa, se seleccionaron 14 validadores que cumplían con los criterios de ser aplicación

Tabla 1.
Preselección de validadores automáticos de accesibilidad

Validadores	Tipo de Aplicación			Licencia	
	Web	Escritorio	Extensión	Gratuita	Pago
TAW	X			X	X
WAVE	X		X	X	X
Examinator	X			X	
Achecker	X			X	
Tenon	X		X	X	
Koa11y		X		X	
HTML CodeSniffer			X	X	
Adesigner		X		X	
Analizador Web	X			X	
Functional Accessibility Evaluator 2.0	X			X	
Total Validator		X		X	X
SortSite	X	X		X	X
Mauve	X			X	
European Internet Inclusion Initiative	X			X	
Siteimprove			X	X	X
CynthiaSays	X			X	
HERA FFX			X	X	
AXE			X	X	
Tanaguru	X			X	
AccessMonitor	X			X	
Nibbler	X			X	X

Fuente: elaboración propia.

web y con licencia gratuita. Se revisó la disponibilidad de cada uno de ellos y se realizó una corta descripción, de acuerdo a la información entregada a través de sus sitios web. A continuación, se presentan los validadores seleccionados:

- **TAW (<https://www.tawdis.net/>):** esta herramienta permite analizar los niveles de accesibilidad (A, AA, AAA) de un sitio web. Soporta las tecnologías HTML, CSS y Javascript. La evaluación es realizada por el ingreso de la URL del sitio web, y se establecen 3 categorías, las cuales se denominan Problemas, Advertencias y No verificados. En cada categoría existe un total de elementos distribuidos en los 4 principios de las WCAG (Operable, Robusto, Comprensible, Perceptible). En el caso particular de los no verificados, el validador recomienda evaluar estos criterios por medio de una evaluación manual. El reporte puede ser enviado vía correo electrónico.

- **WAVE (<https://wave.webaim.org/>):** por medio de este validador es posible determinar la cantidad de errores, alertas, características, elementos estructurales, HTML, ARIA y errores de contraste encontrados en un sitio web. Entre las funcionalidades de WAVE es posible analizar el sitio habilitando o deshabilitando los estilos y los elementos de contraste. También cuenta con dos pestañas en las cuales se puede observar una lista con cada elemento identificado y documentación acerca de su importancia, significado y corrección, en caso de ser necesario. Una característica particular en WAVE es que permite ver la ubicación de cada uno de los elementos en la interfaz del sitio.

- **Examinator (<http://examinator.ws/>):** evalúa la accesibilidad usando como referencia las WCAG 2.0. La validación de accesibilidad se hace a través de una URL, cargando el código fuente o pegando una porción de código en particular. Los elementos encontrados en el sitio son clasificados en cuatro categorías (Excelente, Regular, Mal, Muy mal) y por cada uno se muestra su nombre, propósito y relación con otros criterios. Examinator muestra una tabla resumen con la cantidad total de elementos, su puntaje obtenido y el ponderado final que determinará el nivel de accesibilidad del sitio. La herramienta también realiza un análisis orientado por tipo de discapacidad y un resultado en particular por cada limitación.

- **Achecker (<https://achecker.ca/checker/index.php>):** el uso de esta herramienta determina por medio de una evaluación de accesibilidad la cantidad de problemas conocidos, problemas probables, problemas potenciales, validación HTML y CSS que se encuentran en un sitio web. La evaluación de una página puede realizarse desde la selección de las pautas BITV1.0 (Nivel 2), Sección 508, Acta Stanca, WCAG 1.0 y 2.0 (Niveles A, AA, AAA). El validador no determina un nivel de accesibilidad general, no obstante, por cada uno de los elementos encontrados muestra la porción de código y la manera en la que se puede corregir. Otra característica particular de la herramienta radica en que permite descargar la evaluación en cuatro formatos (PDF, RDF, HTML y CSV).

- **Tenon (<https://tenon.io/>):** determina el nivel de prioridad de cada uno de los elementos en un sitio web clasificándolos en errores y advertencias, mostrando la porción de código que los relaciona y una solución recomendada por la WCAG 2.0. Este validador determina el tiempo que requirió para realizar la evaluación, el tamaño de la pantalla y de la página, además, el nivel de accesibilidad es mostrado al usuario por medio de un gráfico y de manera porcentual. El reporte generado por la aplicación puede ser descargado en formato CSV.

- **Analizador Web (<http://observatorioweb.ups.edu.ec>):** este validador establece el nivel de accesibilidad de un sitio en función de los cuatro principios establecidos por las WCAG; Perceptible, Operable, Robusto y Comprensible. Cada elemento es categorizado en cuatro niveles de medición (Exitoso, Error, Advertencia y No aplica). En los resultados se muestra la porción de código en caso de Error y/o Advertencia, el nivel de criticidad que representa para determinar el nivel de accesibilidad del sitio y una descripción de cómo se debe implementar una corrección adecuada.

- **Functional Accessibility Evaluator 2.0 (<https://fae.disability.illinois.edu/>):** con la ayuda de esta herramienta se verifican los elementos pertenecientes a un sitio en función de cuatro categorías (Violaciones, Advertencias, Controles manuales y Aprobados). La evaluación puede realizarse usando HTML 5 y Aria o las técnicas heredadas desde HTML 4.

- **Tanaguru (<https://www.tanaguru.com/en/>):** este validador clasifica los elementos en función de pasa - no pasa, No aplica, Preclasificados y No evaluados, con el fin de determinar el nivel de accesibilidad del sitio. Como estándar de evaluación toma RGGA 3.0 y sus resultados se muestran por medio de gráficos, de manera porcentual y numérica. Algunas características de la herramienta permiten descargar el resultado final, identificar los criterios de las normativas, la cantidad total de elementos implementados y una descripción acerca de cómo se puede abordar la corrección de los fallos.

- **AccessMonitor (<http://www.acessibilidade.gov.pt/accessmonitor/>):** una de las principales características de este validador cuya evaluación puede hacerse por medio de la WCAG 1.0 o 2.0, está en la posibilidad de cargar un fichero con el código fuente, pegar solo una porción de código o usando la URL del sitio. La finalidad de esta herramienta consiste en cuantificar el nivel de accesibilidad del sitio. La clasificación de resultados se hace teniendo en cuenta los elementos HTML encontrados y la cantidad total de estos elementos con una implementación adecuada. Las pruebas realizadas al sitio se clasifican en función de Errores, Advertencias y Aprobaciones. El validador muestra un nivel de accesibilidad numérico.

- **Nibbler (<https://nibbler.silktide.com/>):** por medio de este validador es posible valorar las siguientes cinco categorías: General, Accesibilidad, Experiencia, Marketing y Diseño. Para cada una de las categorías el validador determina un puntaje general y recomendaciones para una implementación adecuada.

- **CynthiaSays (<http://www.cynthiasays.com/>):** este validador evalúa un sitio indicando con anterioridad las pautas de accesibilidad necesarias (WCAG 1.0 y 2.0) y la Sección 508. Su informe muestra una lista con los criterios y normativas, la cantidad de elementos y el total de elementos implementados de manera correcta, añadiendo una descripción y ayuda para corregir el error.

- **SortSite (<https://www.powermapper.com/>):** la aplicación determina de manera porcentual los problemas que tiene un sitio web evaluando aspectos como accesibilidad, compatibilidad, normativas, usabilidad, errores (como enlaces rotos) y problemas con los motores de búsqueda. SortSite realiza su análisis teniendo en cuenta la Sección 508 y la WCAG 2.0. Para cada elemento muestra una descripción general y en algunos casos el impacto, según una herramienta asistiva.

- **Mauve (<https://mauve.isti.cnr.it/>):** este validador realiza su análisis en función de las pautas WCAG 2.0, WCAG 2.1. Deficiencias visuales y Acta Stanca que pueden ser seleccionadas por el usuario al momento de hacer la evaluación. Para efectos de los resultados de una evaluación las categorías usadas son denominadas como Errores y Advertencias. Con respecto a los criterios de conformidad, esta herramienta muestra una descripción, su código fuente y anexa un enlace que dirige al sitio web del W3C.

- **European Internet Inclusion Initiative (<http://checkers.eiii.eu/>):** esta herramienta determina por medio de un valor numérico el nivel de accesibilidad en una página, clasificando los elementos del sitio en Fallos, Verificaciones y Aprobaciones. Las pruebas realizadas por el validador, determinan la cantidad total de elementos por cada criterio de éxito de las WCAG 2.0, establece una descripción y ayudas técnicas para su adecuada corrección, así como también muestra el extracto de código en el cual se encuentra el error o el elemento a verificar.

Como se presentó, en la tercera etapa se hizo el análisis de un conjunto de criterios definidos para evaluar las principales características de los validadores de accesibilidad. En la Tabla 2 se presentan los resultados asociados con los tres primeros criterios. De acuerdo a la Tabla 2, se pudo evidenciar que doce de los catorce validadores realizan la evaluación de accesibilidad con base en las WCAG 2.0, solo Nibbler y Tanaguru no lo hacen, ya que no aplican ninguno de los estándares analizados en este estudio. Cuatro de las herramientas evalúan siguiendo las WCAG 2.1 y SortSite es el único de los validadores examinados que brinda la opción al usuario de poder elegir uno de los cuatro estándares para hacer la evaluación de accesibilidad. Por otro lado, solo Tenon no aplica medidas de evaluación numéricas y apenas cuatro validadores usan medidas de evaluación porcentuales. Respecto a las categorías de evaluación las más comunes entre los validadores analizados son Errores-Problemas-Fallos y Alertas-Advertencias-Avisos.

Tabla 2.
Criterios evaluados en tercera etapa – Parte 1

Validadores	Estándares					Categorías de evaluación	Medida	
	WCAG 1.0	WCAG 2.0	WCAG 2.1	Sección 508	Otros ¿Cuáles?		Númerica	Porcentual
T.A.W		X				Problemas, Advertencias, No verificados	X	
WAVE		X	X	X		Errores, Alertas, Características, Elementos estructurales, HTML 5 y Contraste con Aria	X	
Examinator		X				Excelente, Regular, Mal, Muy mal	X	
Achecker	X	X		X	Acta Stanca, BITV 1.0	Problemas, Conocidos, Problemas probables, Problemas potenciales, Validación HTML, Validación CSS	X	
Tenon		X	X	X		Errores, Advertencias		X
Analizador Web		X			ISO 40500	Comprensible, Operable, Perceptible, Robusto, Criterios analizados, Criterios no aplicados	X	X
Functional Accessibility Evaluator 2.0		X				Violaciones, Advertencias, Chequeos manuales, Aprueba	X	
Tanaguru					RGAA 3.0	Pasa, Falla, No aplica, Precalificado, No ha sido evaluado	X	X
Access Monitor	X	X				OK, Errores, Avisos	X	
Nibbler					No identificado	Accesibilidad global, Experiencia, Mercadeo, Tecnología	X	
CynthiaSays	X	X				Niveles de conformidad de la WCAG	X	
SortSite	X	X	X	X		Calidad total, Errores, Accesibilidad, Compatibilidad, Búsqueda, Estándares, Usabilidad	X	X
Mauve		X			Acta Stanca, deficiencias visuales	Errores y Advertencias	X	
European Internet Inclusion Initiative		X				Fallos, Por verificar, Aprobó	X	

Fuente: elaboración propia.

La segunda parte de los criterios de evaluación definidos en la tercera etapa son presentados en la Tabla 3, los cuales están asociados con la presentación de resultados, la posibilidad de su descarga y las citaciones encontradas para cada validador. Se evidenció que solo cinco de los catorce validadores permite la descarga de los resultados de la evaluación automática de accesibilidad. Las herramientas WAVE y Access Monitor son las únicas que permiten visualizar los errores de accesibilidad en la interfaz del sitio web. Por otro lado, todos los validadores examinados muestran los criterios de las normativas que se están incumpliendo. Solo seis de las herramientas muestran gráficos para representar los resultados y nueve le brindan al usuario formas en las cuales puede corregir los errores de accesibilidad detectados.

Tabla 3.
Criterios evaluados en tercera etapa – Parte 2

Validadores	Presentación de resultados						Descarga de resultados		Cantidad de citaciones
	Gráficos	Criterios de las normas	Código fuente	Ubicación del error en la interfaz	Cantidad elementos / Cantidad elementos aprobados	¿Cómo corregir el error?	Sí	No	
T.A.W		X			X		X		28
WAVE		X	X	X		X		X	29
Examinator		X	X		X			X	8
Achecker		X	X				X		20
Tenon	X	X	X				X		2
Analizador Web	X	X	X		X	X		X	1
Functional Accessibility Evaluator2.0	X	X			X	X	X		5
Tanaguru	X	X			X	X	X		1
Access Monitor		X	X	X	X	X		X	3
Nibbler	X	X	X		X	X		X	0
Cynthia Says		X			X	X		X	10
SortSite	X	X			X	X		X	11
Mauve		X	X					X	4
European Internet Inclusion Initiative		X	X		X	X		X	3

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a la citación de cada uno de los validadores analizados, se obtiene el siguiente ranking que es presentado a continuación en la Tabla 4. El análisis de las citaciones permitió identificar cuáles son los validadores que más se están utilizando para realizar evaluaciones de accesibilidad en diferentes contextos. Los resultados mostraron que WAVE y TAW son los que más han sido referenciados en trabajos a nivel investigativo, lo que podría indicar en términos generales que son los que mejor apoyan este tipo de procesos.

Tabla 4.
Validadores de accesibilidad más referenciados

Validador de accesibilidad	Cantidad de citaciones
WAVE	29
TAW	28
Achecker	20
SortSite	11
CynthiaSays	10
Examinator	8

Fuente: elaboración propia.

6. Conclusiones y trabajos futuros

Se presentó un proceso metodológico que permitió realizar un análisis comparativo de herramientas disponibles para validar de forma automática la accesibilidad de sitios web. Se analizaron diferentes criterios de catorce validadores seleccionados con el fin de ofrecer un apoyo en el proceso de evaluación de accesibilidad. Los validadores de accesibilidad son herramientas fundamentales en el proceso de mejora de la accesibilidad web. Sin embargo, de los validadores analizados en este trabajo, ninguno cumplió con todos los criterios examinados respecto a la forma en la que entregaban los resultados, lo cual es un problema para los usuarios en la interpretación de la información obtenida en los análisis de accesibilidad.

Después de analizar los resultados obtenidos, se puede concluir que en el proceso de evaluación de accesibilidad no es suficiente utilizar un solo validador, debido a que ninguno incluye todos los criterios, mecanismos de visualización y características para hacer un completo análisis de accesibilidad. Este trabajo puede servir como un instrumento de apoyo para un usuario en la selección de los validadores a utilizar para la evaluación de accesibilidad automática de un sitio web, de acuerdo con sus preferencias de cómo puede ser más comprensible la entrega de los resultados.

Como trabajo futuro se plantea analizar una cantidad mayor de validadores de accesibilidad, incluyendo validadores web, extensiones y herramientas de escritorio. Otro trabajo futuro será analizar las observaciones que tengan usuarios reales respecto a la forma en la que entregan los resultados los validadores existentes, para identificar cuáles son sus preferencias y los validadores que las cubren mejor. Se plantea realizar una evaluación de accesibilidad de un conjunto de sitios web de un mismo campo, utilizando los validadores de accesibilidad analizados, con el fin de comparar sus resultados en un caso concreto.

7. Agradecimientos

El trabajo presentado en este artículo se enmarca en el proyecto “Tecnologías para apoyo a procesos de aprendizaje en la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales” financiado por la Universidad Nacional de Colombia.

8. Referencias

- Agüero, Dante; Perea, Antonio (2009). *Diseño de Sitios Web Accesibles*. Universidad Nacional de la Rioja, Argentina. Recuperado de <http://www.virtualeduca.info/ponencias2010/8/AWUNLAR.pdf>
- Abuaddous, Hayfa; Zalisham-Jali, Mohd; Basir, Nurlida (2016). Web Accessibility Challenges. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 7(10), 172–181. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2016.071023>

- Akram, Muhammad; Sulaiman, Rosnafisah (2017). A Systematic Literature Review to Determine the Web Accessibility Issues in Saudi Arabian University and Government Websites for Disable People. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 8(6), 321–329. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2017.080642>
- Al-Ahmad, Ahmad; Ahmaro, Ibraheem; Mustafa, Malik (2015). Comparison between web accessibility Evaluation tools. *Al-Madinah Technical Studies*, 1(4).
- Al-Khalifa, Hend; Baazeem, Ibtehal; Alamer, Reem (2017). Revisiting the accessibility of Saudi Arabia government websites. *Universal Access in the Information Society*, 16(4), 1027–1039. 09-016-0495-7 <https://doi.org/10.1007/s10209-016-0495-7>
- Alonso-Virgós, Lucía; Rodríguez-Baena, Luis; Pascual-Espada, Jordán; González-Crespo, Rubén (2018). Web page design recommendations for people with down syndrome based on users' experiences. *Sensors (Switzerland)*, 18(11), 4047. <https://doi.org/10.3390/s18114047>
- Brajnik, Giorgio; Vigo, Markel; Yesilada, Yeliz; Harper, Simon. (2016). Group vs individual web accessibility evaluations: Effects with novice evaluators. *Interacting with Computers*, 28(6), 843–861. <https://doi.org/10.1093/iwc/iww006>
- Ismailova, Rita; Inal, Yavuz (2018). Accessibility evaluation of top university websites: a comparative study of Kyrgyzstan, Azerbaijan, Kazakhstan and Turkey. *Universal Access in the Information Society*, 17(2), 437–445. <https://doi.org/10.1007/s10209-017-0541-0>
- Ismailova, Rita; Kimsanova, Guilda (2017). Universities of the Kyrgyz Republic on the Web: accessibility and usability. *Universal Access in the Information Society*, 16(4), 1017–1025. <https://doi.org/10.1007/s10209-016-0481-0>
- Ismail, A.; Kuppusamy, K. S.; Nengroo, A. S. (2018). Multi-tool accessibility assessment of government department websites: a case-study with JKGAD. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 13(6), 504–516. <http://doi.org/10.1080/17483107.2017.1344883>
- Jaeger, Paul (2004). Beyond Section 508: The spectrum of legal requirements for accessible e-government Web sites in the United States. *Journal of Government Information*, 30(4), 518–533. <https://doi.org/10.1016/j.jgi.2004.09.010>
- Kaur, Arvinder; Dani, Diksha (2017). Comparing and evaluating the effectiveness of mobile Web adequacy evaluation tools. *Universal Access in the Information Society*, 16(2), 411–424. <https://doi.org/10.1007/s10209-016-0466-z>
- King, Bridgett; Youngblood, Norman (2016). E-government in Alabama: An analysis of county voting and election website content, usability, accessibility, and mobile readiness. *Government Information Quarterly*, 33(4), 715–726. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2016.09.001>
- Kirkpatrick, Andrew; Connor, Joshue; Campbell, Alastair; Cooper, Michael (5 de junio de 2018). W3C Web Accessibility Initiative: Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. Recuperado de <https://www.w3.org/TR/WCAG21/>
- Krepp, Benjamin (2014). Development of section 508-compliant document production protocols and websites. *Transportation Research Record*, 2469(1), 100–107. <https://doi.org/10.3141/2469-11>

- Kurt, Serhat (2017). Accessibility of Turkish university Web sites. *Universal Access in the Information Society*, 16(2), 505–515.
<https://doi.org/10.1007/s10209-016-0468-x>
- Laufer-Nir, Hila; Rimmerman, Arie (2018). Evaluation of Web content accessibility in an Israeli institution of higher education. *Universal Access in the Information Society*, 17(3), 663–673.
<https://doi.org/10.1007/s10209-018-0615-7>
- López-Zambrano, Javier; Moreira-Pico, Ramón; Alava-Cagua, Nathaly (2018). Metodología para valorar y clasificar herramientas de evaluación de accesibilidad web. *E-Ciencias de la información* 8(1), 1-18.
<https://doi.org/10.15517/eci.v8i1.30012>
- Martín, José; Amado-Salvatierra, Héctor; Hilera, José (2016). MOOCs for all. Evaluating the accessibility of top MOOC platforms. *International Journal of Engineering Education*, 32(Extra 5), 2274-2283.
- Pacheco, Humberto; Amorim, Patricia; Barbosa, Priscyla; Ferreira, Simone (2017). Comparative Analysis of Web Accessibility Evaluation Tools. En *IHC '16 Proceedings of the 15th Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*. Sao Paulo, Brazil.
<https://doi.org/10.1145/3033701.3033747>
- Power, Christopher; Pimenta-Freire, André; Petrie, Helen (2009). Integrating accessibility evaluation into web engineering processes. *International Journal of Information Technology and Web Engineering*, 4(4), 54–77.
<https://doi.org/10.4018/jitwe.2009100104>
- Richards, Jan; Spellman, Jeanne; Treviranus, Jutta (24 de septiembre de 2015). *W3C Web Accessibility Initiative: Authoring Tool Accessibility Guidelines (ATAG) 2.0*. Recuperado de
<https://www.w3.org/TR/ATAG20/>
- Shawn-Lawton, Henry (Febrero de 2005). *W3C Web Accessibility Initiative: Introduction to Web Accessibility*. Recuperado de
<https://www.w3.org/WAI/fundamentals/accessibility-intro/>
- Spellman, Jeanne; Allan, Jim; Shawn-Lawton, Henry (2016). *W3C Web Accessibility Initiative: User Agent Accessibility Guidelines (UAAG)*. Recuperado de
<https://www.w3.org/WAI/standards-guidelines/uaag/>
- United States Access Board (21 de diciembre de 2000). *United States Access Board: Section 508 Standards for Electronic and Information Technology*. Recuperado de
<https://www.access-board.gov/guidelines-and-standards/communications-and-it/about-the-section-508-standards/section-508-standards>
- Varela, C., Miñán, A., Hilera, J., Restrepo, F., Amado, H., Córdova, M. y Villaverde, A. (2012). Estándares y legislación sobre accesibilidad web. En *IV Congreso Internacional ATICA 2012*. Loja, Ecuador (pp. 46–53). Recuperado de
http://www.esvial.org/wp-content/files/Atica2012_pp47-54.pdf
- Watanabe, Willian; Fortes, Renata; Dias, Ana (2017). Acceptance tests for validating ARIA requirements in widgets. *Universal Access in the Information Society*, 16(1), 3–27.
<https://doi.org/10.1007/s10209-015-0437-9>
- Web Accessibility Initiative (W3C) (Marzo de 2006). *W3C Web Accessibility Initiative: Web Accessibility Evaluation Tools List*. Recuperado de
<https://www.w3.org/WAI/ER/tools/>



Implementación de autómatas celulares usando desarrollo dirigido por comportamiento

Implementation of cellular automata using behavior-driven development

Victor Vargas-Forero¹
Luz Muñoz-Ceballos²
Ángel García-Baños³

¹ Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: victor.m.vargas@correounivalle.edu.co;
orcid: <http://orcid.org/0000-0002-2317-7365>

² Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: luz.estela.munoz@correounivalle.edu.co;
orcid: <http://orcid.org/0000-0002-2675-1238>

³ Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: angel.garcia@correounivalle.edu.co;
orcid: <http://orcid.org/0000-0002-5388-6912>

Recibido: 15-11-2018 Aceptado: 06-08-2019

Cómo citar: Vargas-Forero, Victor; Muñoz-Ceballos, Luz; García-Baños, Ángel (2020). Implementación de autómatas celulares usando desarrollo dirigido por comportamiento. *Informador Técnico*, 84(1), 48-66.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2257>

Resumen

En este trabajo se presenta parte de la implementación de un autómata celular usando el desarrollo dirigido por comportamiento Behavior-Driven Development (BDD) como estrategia para la construcción de una herramienta que permita modelar la accesibilidad peatonal dentro de un espacio abierto como es el campus de la Universidad del Valle en Cali, Colombia. Para la implementación se usó BDD como método de desarrollo, Python como lenguaje de programación y Behave para escribir las pruebas en lenguaje natural. Como resultados se presentaron parte del modelo implementado del autómata celular y algunos de los requerimientos con sus respectivos escenarios para BDD e implementación, donde se explicó el uso del framework Behave en Python. Se concluyó que BDD es una buena herramienta para este tipo de proyectos porque se obtuvo como resultado 706 líneas de código fuente correspondientes al modelo del autómata celular, probadas con un total de 144 pruebas definidas desde la fase inicial del proyecto y superadas satisfactoriamente, de acuerdo a una encuesta de aceptación del uso de la metodología BDD por parte de los usuarios del proyecto, y la primera aplicación de BDD en una simulación de movilidad peatonal.

Palabras clave: software ágil; BDD; autómatas celulares; accesibilidad peatonal; procesos y métodos de desarrollo de software.

Abstract

This work aimed to present part of the implementation of a cellular automaton using Behavior-Driven-Development (BDD) as a strategy for the construction of a tool that allows to model pedestrian accessibility within an open space such as the campus of the Universidad del Valle in Cali, Colombia. For the implementation, BDD was used as a development method, Python as a programming language and Behave to write the tests in natural language. As a result, part of the implemented model of the cellular automaton was presented, some of the requirements with their respective scenarios for BDD and implementation, where the use of the Behave framework in Python was explained. It was concluded that BDD is a good tool for this type of projects because it resulted in 706 lines of source code corresponding to the model of the cellular automaton

tested with a total of 144 tests defined from the initial phase of the project and successfully passed, a survey of acceptance of the use of the BDD methodology by project users and the first application of BDD in a pedestrian mobility simulation.

Keywords: agile software; BDD, cellular automata; pedestrian accessibility; processes and software development methods.

1. Introducción

Se presenta la experiencia de una implementación del modelo de un autómata celular para analizar la accesibilidad peatonal al interior del campus universitario de la ciudadela de Meléndez de la Universidad del Valle, tomando como punto de partida el estudio realizado por Buitrago y Kattán (2011), además de implementar el desarrollo dirigido por el comportamiento *Behavior-driven development* (BDD) (North, 2006), como herramienta metodológica para dicha construcción, a partir del resultado del trabajo de grado de Muñoz, (2017).

Mediante el autómata celular se construyó el núcleo del simulador de los peatones del campus universitario, modelo que fue presentado en Vargas-Forero; Muñoz-Ceballos; García-Baños; Jaramillo-Molina (2019). Existen diversos estudios que se han centrado en problemas de microsimulación, como por ejemplo (Gipps; Marksjö, 1985), pero la mayoría de estos problemas se centran en la evacuación de los peatones (Gudowski; Waś, 2007) y algunos involucran las características ambientales y los comportamientos de los vecinos (Was, 2005). Los problemas de accesibilidad y movilidad peatonal son actualmente un campo muy analizado, como se estudia en Martins-Gonçalves; Nuñez-Basantes (2017); Chen *et al.*, (2018); Qin; Curtin; Rice (2018).

Por otra parte, otro reto para el proyecto del grupo de trabajo era probar el desarrollo de software ágil en un proyecto de investigación usando autómatas celulares. Desde el 2001 con la iniciativa del Manifiesto Ágil (Beck, 2001) inició una corriente muy fuerte que busca cambiar la forma como se desarrolla software (metodologías tradicionales, la más representativa para la época RUP (Khamis; Abdelmonem, 2002). Como se puede observar en Poppendieck y Cusumano (2012), existe una gran diferencia entre los procesos de desarrollo ágil y las metodologías tradicionales, por tal motivo, se propone un conjunto de principios para guiar el proceso de desarrollo. A partir del Manifiesto Ágil, surgen muchas iniciativas como Test Driven Development (TDD), Acceptance Test Driven Development (ATDD), Behavior Driven Development (BDD), entre otras. Se decide trabajar con BDD por las características que presenta este proceso de desarrollo de software como lenguaje ubicuo (basado en el dominio del problema), proceso de descomposición iterativa, descripción de texto con historias de usuario y plantillas de escenarios, pruebas de aceptación automatizadas con reglas de mapeo, código de especificación orientado al comportamiento legible y diferentes fases del desarrollo dirigidas por el comportamiento. Además, se optó por Behave (Engel; Rice; Jones, 2012) como herramienta de soporte para BDD, por ser una de las herramientas que más características cumple (Solis; Wang, 2011).

Por lo anterior, esta investigación se desarrolla de la siguiente manera: en la primera parte se expone la metodología propuesta. En la segunda se hace una breve presentación del modelo del autómata celular a construir. En la tercera se muestran algunos de los resultados obtenidos al construir el modelo usando BDD y al final, en la cuarta parte, se presentan las conclusiones del desarrollo realizado.

2. Metodología

El trabajo se desarrolló siguiendo las directrices de *BDD* (North, 2006; Ferguson-Smart, 2014), estas se centran en los “comportamientos” esperados del software y no en cómo debe ser implementada la lógica del mismo, facilitando el entendimiento entre el usuario final y el desarrollador. Esta característica era deseable en el proyecto porque se esperaba que los requerimientos cambiaran muy frecuentemente a lo largo de la ejecución del mismo. BDD surge desde la iniciativa del Manifiesto Ágil (Beck *et al.*, 2001), la cual se fundamenta en los valores indicados en la Tabla 1, dando mayor valor a los elementos de la izquierda que a los de la derecha:

Tabla 1.
BDD del Manifiesto Ágil

Izquierda		Derecha
Individuos e interacciones	sobre	Procesos y herramientas
Software funcionando	sobre	Documentación extensiva
Colaboración con el cliente	sobre	Negociación contractual
Respuesta ante el cambio	sobre	Seguir un plan

Fuente: elaboración propia.

A partir de esta iniciativa surgen otras, que buscan mejorar las metodologías tradicionales que se usaban hasta la fecha, una de estas es TDD (Jurado, 2010) que involucra otras dos prácticas: escribir las pruebas antes de escribir el código del programa y refactorizar hasta terminar de construir toda la solución. BDD se puede ver como una mejora de TDD, donde las características de TDD son incorporadas en BDD, de tal manera que TDD se centra en las pruebas unitarias y BDD se enfoca en pruebas de más alto nivel, en la funcionalidad, la aceptación, la búsqueda de definir el problema y no como se debe resolver.

En la Figura 1 se observa que la estrategia metodológica en general para BDD, consiste en construir pruebas de aceptación del usuario, pruebas unitarias, luego hacer el código necesario para pasar dichas pruebas y refactorizar con las nuevas pruebas, realizando este proceso en ciclos e incorporando las nuevas funcionalidades.

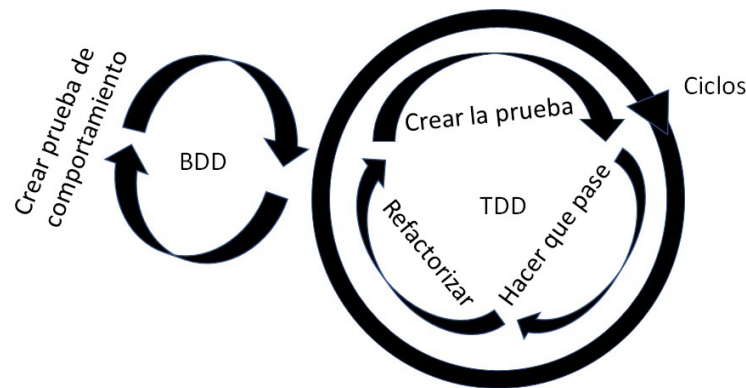


Figura 1. Desarrollo dirigido por el comportamiento
Fuente: elaboración propia.

3. Modelo

A continuación, se presenta brevemente el modelo del autómata celular implementado. Para profundizar en este, se recomienda leer la definición completa en (Vargas-Forero *et al.*, 2019). El autómata celular se definió como una tupla (G, S, N, R), es decir, un conjunto ordenado de objetos caracterizados por:

- (G): la rejilla
- (S): los estados que pueden tomar una celda
- (N): la vecindad
- (R): las reglas de transición

Para el proyecto de la accesibilidad peatonal con autómatas celulares se definió:

3.1. (G) *Rejilla o cuadrícula, donde cada celda puede contener un peatón*

- Cada celda es cuadrada y mide aproximadamente 40 x 40 , valor tomado por sugerencia en (Schadschneider, 2001).
- El número de peatones que puede haber en una celda es 0 o 1.
- El autómata se define sobre una cuadrícula que representa el campus universitario y cuyas dimensiones son 2.589 filas por 1.906 columnas, que se obtiene al dividir la dimensión de todo el campus universitario con el tamaño de la celda propuesta.

3.2. (S) *Conjunto finito de estados que puede tomar una celda*

Un elemento adicional tenido en cuenta en esta definición del modelo, es el concepto de impedancia y será entendida como la resistencia (disminución de velocidad) que tiene un peatón al desplazarse por una vía o camino, ocasionada por motivos de una rampa, escalera o dificultad de pasar por la vía.

Para el modelo propuesto, las ("") representan una celda vacía equivalente a un sendero no transitable, la letra P representa una celda ocupada por un peatón, el número 0 una celda vacía de un sendero transitable sin impedancia y cuando la celda tenga un valor entre 1 y n, esto representa que la celda está vacía y el sendero es transitable con impedancia. El valor de la impedancia depende del valor de n, en el que 1 es la impedancia mínima que retrasa al peatón un ciclo por cada movimiento, 2 retrasaría el peatón dos ciclos por cada movimiento y así sucesivamente.

3.3. (N) *Vecindad correspondiente a cada celda*

Para el proyecto se tomó como base la vecindad de Moore extendida que es una extensión de la vecindad de Von Newman. Esta vecindad contiene celdas en la diagonal como se presenta en la Figura 2. Para entender un poco más el concepto ver Wolfram (2019).

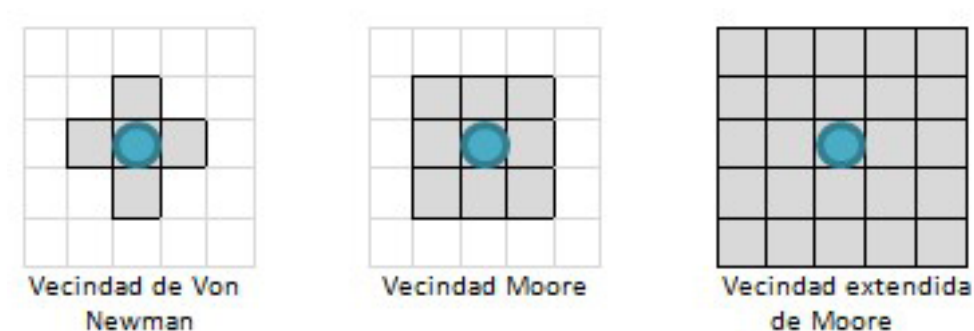


Figura 2. Tipos de vecindad
Fuente: elaboración propia.

3.4. (R) *Reglas de transición que definen el modelo del autómata celular*

La propuesta del modelo tiene el alcance de la vecindad máxima a 2 celdas y no se consideran todos los vecinos dentro de los movimientos posibles. El peatón no considera retroceder en su trayectoria de origen a destino, por lo que solo realiza movimientos en un solo sentido con dos velocidades. Como se puede ver en la Figura 3, en el lado izquierdo se observa que las flechas solo se desplazan una posición y apuntan solo en la dirección de origen y destino, y no apuntan del destino al origen, esto indica que los peatones no retroceden en el modelo y solo se mueven hacia adelante una posición que implica a la velocidad 1. En el lado derecho se puede observar que es parecido al de la izquierda, solo que el movimiento es de dos celdas, esto corresponde a la velocidad 2.

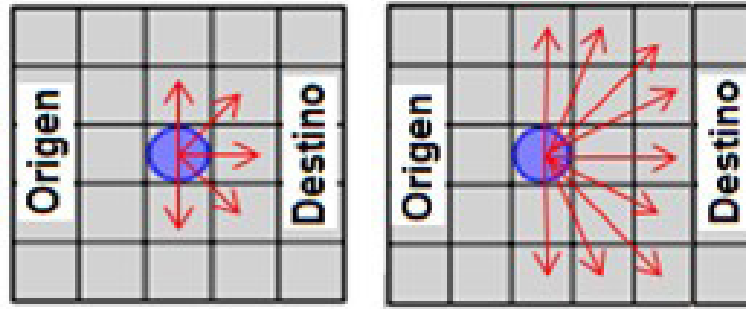


Figura 3. Tipos de velocidad, izquierda velocidad 1 y derecha velocidad 2
Fuente: elaboración propia.

Tras lo anterior, solo se presenta una idea base para entender algunos elementos de la implementación, con el fin de entender con mayor profundidad este modelo se recomienda ver el artículo de Vargas-Forero *et al.* (2019) donde se presenta cómo se mueve el peatón en el autómata celular.

4. Resultados

A continuación, se presentan, explican y se muestran algunos ejemplos de las etapas contempladas en el proceso de construcción de dicho desarrollo:

4.1. Planeación

BDD es una técnica de desarrollo ágil orientada al negocio y comportamiento de una aplicación. Dado que su principal objetivo es preguntar qué debería hacer la aplicación, se utilizaron técnicas de indagación con los usuarios finales, de manera que éstas permitieran formular y escribir las pruebas (tests) de comportamiento. Con el propósito de dar claridad al desarrollo, se realizaron prototipos que dieran solución a uno o varios de los requerimientos. Para que el desarrollo se diera de forma incremental, se decidió trabajar desde los requerimientos más básicos a los más complejos.

4.2. Requerimientos del sistema

Como apoyo al proceso de planeación se definió, de forma preliminar, una especificación de requerimientos para establecer el alcance de la aplicación. Con las necesidades determinadas por los requerimientos se delimitó el alcance de la aplicación y se estimó una aproximación clara de las funcionalidades para dar cumplimiento al objetivo propuesto. La solución debe contar con las siguientes funcionalidades:

- Representar la red peatonal del campus universitario Sede Meléndez.
- Representar peatones.
- Generar peatones.
- Movimiento de los peatones.
- Implementación de las reglas del modelo del autómata celular.
- Verificación de las reglas del autómata celular.

- Interfaz gráfica que permita observar el comportamiento de los peatones sobre la red peatonal del campus universitario Sede Meléndez.
- El sistema debe funcionar sobre un sistema de información geográfico.

4.3. Especificación de los requerimientos

- El sistema debe permitir representar la red peatonal del campus universitario. Esta red debe contemplar las 60 edificaciones y la red peatonal (rutas) correspondiente a la cartografía suministrada por Grupo de Investigación en Transporte, Tránsito y Vías – GITTIV.
- El sistema debe permitir representar un peatón con las siguientes características: origen, destino, ruta, velocidad y posición actual en la cual está ubicado el peatón.
- El sistema debe permitir generar peatones para cada ruta dado un origen y un destino, el tiempo inicial y tiempo final de generación de los peatones, el número de peatones a generar, la probabilidad de generación de los peatones y la probabilidad para generar peatones de velocidad 1 y 2 como se puede observar en la Figura 3 del modelo.

Movimiento de los peatones:

- El sistema debe proporcionar un mecanismo para simular el movimiento de los peatones.
- El sistema debe proporcionar un mecanismo para resolver los obstáculos.
- El sistema debe permitir configurar segmentos de rutas para evaluar el flujo peatonal.
- Dadas las coordenadas de un segmento de la ruta, el sistema debe determinar cuántos peatones pasan en un tiempo T.
- El sistema debe permitir configurar segmentos de rutas para evaluar la densidad peatonal.
- Dadas las coordenadas de un segmento de la ruta, el sistema debe determinar cuántos peatones hay en un tiempo T.
- Dada la ubicación de un peatón en la rejilla que representa el campus universitario Sede Meléndez, el sistema debe determinar si es posible que un peatón se mueva y cuál es su nueva ubicación.
- Implementación de las reglas definidas para el modelo del autómata celular.

Verificación de las reglas del modelo del autómata celular:

- El sistema debe permitir calcular la distancia del peatón a su lugar de destino.
- Dada el lugar de origen y lugar de destino de un peatón, el sistema debe determinar la orientación de este.
- Dada la ubicación actual de un peatón, el sistema debe determinar su próxima ubicación y verificar si ese movimiento está fuera del rango establecido.
- Dada la ubicación actual de un peatón, el sistema debe determinar su próxima ubicación y verificar si ese movimiento está fuera de la ruta establecida.
- Dada la ubicación actual de un peatón, el sistema debe determinar su próxima ubicación y verificar si ese movimiento está fuera de la rejilla establecida.
- Dada un peatón que se encuentra en una posición actual y cuya velocidad es 2, el sistema debe evaluar si se puede desplazar y a qué velocidad (velocidad 2, velocidad 1, no se mueve).

- Dado un peatón que se encuentra en una posición actual y cuya velocidad es 1, el sistema debe evaluar si se puede desplazar (velocidad 1, no se mueve).
- El sistema debe proporcionar una interfaz gráfica que permita observar el comportamiento de los peatones sobre la red peatonal del campus universitario ciudad Meléndez.
- Una vez inicia la ejecución del sistema, este debe mostrar la cuadrícula que representa el campus universitario sede Meléndez y la red peatonal.
- Dadas las coordenadas esquina superior izquierda y esquina inferior derecha, el sistema debe mostrar el escenario correspondiente a dichas coordenadas en la cuadrícula que representa el campus universitario sede Meléndez.
- El sistema debe proporcionar un menú emergente, mediante el cual el usuario podrá seleccionar diferentes escenarios previamente establecidos para observar el comportamiento de los peatones.
- Mostrar los movimientos de los peatones.
- El sistema debe verificar la ubicación de todos los peatones y actualizar la interfaz, mostrando de esta manera cómo fluyen los peatones dado un origen y un destino dentro de la red peatonal que representa el campus universitario Sede Meléndez.

4.4. Uso de BDD

Lo primero que se debe definir en BDD es la creación de los escenarios del proyecto, es decir, los requerimientos del proyecto, donde se define cada una de sus necesidades. Se toma como ejemplo el escenario peatón fuera del rango, ya que es un buen ejemplo por ser fácil de entender y sirve para explicar el uso de BDD. En la Tabla 1 se presentan algunos ejemplos del uso de BDD para el autómata celular:

Tabla 2.
Plantilla BDD. Verificar si el movimiento está fuera del rango de la matriz

Parte	Descripción
Scenario Outline	Verifica si el movimiento está fuera del rango de la matriz.
Given (Dado)	El inicio a la simulación, se definen las reglas del autómata celular.
When (Cuando)	Cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento está dentro de la matriz definida. Como ejemplo, para la matriz (<matriz>) donde se puede mover el peatón, la posición <actual> del peatón y los valores de movimiento en <movimientoxy>.
Then (Entonces)	Se determina que el peatón en la posición <actual> con movimiento en <movimientoxy>, tiene (<resultado>) donde 1 es un movimiento fuera del rango y 0 no.

Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en la Tabla 2, el escenario se presenta en cuatro partes las cuales se explican a continuación:

- **Scenario Outline:** se presenta una descripción de lo que debe hacer esta funcionalidad del programa. El caso verifica si el movimiento está fuera del rango de la matriz de peatones. Eso quiere decir que deberá retornar verdadero si el movimiento está fuera de la matriz.
- **Given:** se determinan los elementos iniciales necesarios para que la funcionalidad se pueda implementar. Para el escenario, se inicia una instancia del objeto reglas. Este objeto reglas se crea al iniciar la simulación.
- **When:** en este campo se definió el momento y los elementos necesarios para realizar la funcionalidad. Para este caso se definió una matriz donde se puede mover el peatón, la posición donde el peatón se encuentra y, por último, se necesita la posición donde el peatón será movido.

• **Then:** finalmente, se definió el resultado esperado de la funcionalidad. Para el ejemplo se utilizó el resultado con la posición dada del peatón y la nueva posición (x, y) del mismo.

Para completar el escenario se proponen las pruebas que deberá pasar la implementación.

Como se puede observar en la Figura 4, se presentan todos los ejemplos a realizar para entender y probar la funcionalidad. A continuación, se realizará una explicación de cada uno de ellos la primera característica es la verificación si un movimiento está dentro del rango posible de un peatón.

Ejemplos: fuera_del_rango_matriz

matriz	actual	movimientoxy	resultado
0,0,0,1,1,0,1,1	0,0	0,0	0
0,0,0,1,1,0,1,1	0,0	1,0	0
0,0,0,1,1,0,1,1	1,1	1,0	1
0,0,0,1,1,0,1,1	0,0	2,2	1
0,0,0,1,1,0,1,1	0,0	1,1	0

Figura 4. Ejemplos escenario 1
Fuente: elaboración propia.

Escenario: movimiento posible del peatón.

- **Dado:** el movimiento de un peatón de una posición origen a una posición destino y todos los movimientos posibles.
- **Cuando:** la posición destino sea un movimiento posible.
- **Entonces:** la nueva posición del peatón es la posición destino.

Escenario: movimiento no posible del peatón.

- **Dado:** el movimiento de un peatón de una posición origen a una posición destino y todos los movimientos posibles.
- **Cuando:** la posición destino no sea un movimiento posible.
- **Entonces:** la nueva posición es la misma posición actual.

Hasta aquí termina la primera parte de BDD, donde se definieron las funcionalidades que necesitan ser desarrolladas para resolver el problema y completar la solución. El siguiente paso fue construir las pruebas necesarias desde la más elemental hasta la más compleja para construir el programa.

A continuación, se presenta la prueba que fue desarrollada para dar la solución del problema. La primera parte define el uso de las librerías que se necesitan en Python para el uso de BDD, como también la definición del tag @given, en el cual se inicia la instancia de las reglas del autómata celular para definir sus movimientos.

```
from behave import given, when, then
from hamcrest import assert_that, equal_to, is_not
from Reglas import Reglas
@given('se definen las reglas del autómata celular')
def step_inicia(context):
    context.objReglas = Reglas()
```

En esta parte de la prueba se define el tag @when. En esta etiqueta se realizó la toma de los datos de la prueba, como también la ejecución de los programas contruidos para realizar la o las funcionalidades definidas en los escenarios.

@when('se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento está dentro de la matriz definida.

Como ejemplo, para la matriz ({matriz}) donde se mueve el peatón, la posición {actual} del peatón y los valores de movimiento en ({movimientoxy}).')

```
def step_fueraDelRango(context, matriz, actual, movimientoxy):
```

```
    mat = matriz.split(',')
```

```
    sig = 0
```

```
    dic = {}
```

```
    tam = int(len(mat)/2)
```

```
    dic['tamano'] = ( int(tam/2), int(tam/2) )
```

```
    for x in range (0, tam):
```

```
        dic[(int(mat[ sig ]), int(mat[ sig + 1 ]))] = 0
```

```
        sig += 2
```

```
    x1 = int(actual.split(',')[0])
```

```
    y1 = int(actual.split(',')[1])
```

```
    x = int(movimientoxy.split(',')[0])
```

```
    y = int(movimientoxy.split(',')[1])
```

```
    context.resultadoMovimiento = context.objReglas.
```

```
    fueraDelRango( dic , [x1, y1], x, y )
```

Como se observa en el código anterior, la mayor parte es para construir la prueba con los datos definidos en el escenario y solo se usó una sola línea de código para llamar la funcionalidad que verifica si el movimiento del peatón se encuentra dentro de la matriz definida para el movimiento de este.

Por último, se definió la comparación de los datos de prueba. En este código se observó que solo se evalúa si el resultado de la ejecución del código es igual al esperado en el escenario definido previamente.

```
@then('se determina que el peatón en la posición {actual}
```

```
con movimiento en ({movimientoxy}), tiene ({resultado})
```

```
donde 1 es un movimiento fuera del rango y 0 no.')
```

```
def step_verifica_movimiento(context, actual, movimientoxy, resultado):
```

```
    assert_that(bool(int(resultado)),
```

```
    equal_to(context.resultadoMovimiento))
```

Esta prueba se aplicó para cada uno de los datos definidos y se obtiene como resultado la siguiente salida por consola a la ejecución de las pruebas.

• **Scenario Outline:** verifica si el movimiento está fuera del rango de la matriz. -- @1.1 fuera_del_rango_matriz # peatones.feature:31.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

• **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento está dentro de la matriz definida. Como ejemplo, para la matriz (0,0,0,1,1,0,1,1) donde se mueve el peatón, la posición 0,0 del peatón y los valores de movimiento en (0,0). \# steps\step_reglas.py:34.

• **Then:** se determina que el peatón en la posición 0,0 con movimiento en (0,0), tiene (0) donde 1 es un movimiento fuera del rango y 0 no. # steps\step_reglas.py:50.

• **Scenario Outline:** verifica si el movimiento está fuera del rango de la matriz. -- @1.2 fuera_del_rango_matriz # peatones.feature:32.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

• **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento está dentro de la matriz definida. Como ejemplo, para la matriz (0,0,0,1,1,0,1,1) donde se mueve el peatón, la posición 0,0 del peatón y los valores de movimiento en (1,0). # steps\step_reglas.py:34.

• **Then:** se determina que el peatón en la posición 0,0 con movimiento en (1,0), tiene (0) donde 1 es un movimiento fuera del rango y 0 no. # steps\step_reglas.py:50.

• **Scenario Outline:** verifica si el movimiento está fuera del rango de la matriz. -- @1.3 fuera_del_rango_matriz # peatones.feature:33.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

• **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento está dentro de la matriz definida. Como ejemplo, para la matriz (0,0,0,1,1,0,1,1) donde se mueve el peatón, la posición 1,1 del peatón y los valores de movimiento en (1,0). # steps\step_reglas.py:34.

• **Then:** se determina que el peatón en la posición 1,1 con movimiento en (1,0), tiene (1) donde 1 es un movimiento fuera del rango y 0 no. # steps\step_reglas.py:50.

• **Scenario Outline:** verifica si el movimiento está fuera del rango de la matriz. -- @1.4 fuera_del_rango_matriz # peatones.feature:34.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

• **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento está dentro de la matriz definida. Como ejemplo, para la matriz (0,0,0,1,1,0,1,1) donde se mueve el peatón, la posición 0,0 del peatón y los valores de movimiento en (2,2). # steps\step_reglas.py:34.

• **Then:** se determina que el peatón en la posición 0,0 con movimiento en (2,2), tiene (1) donde 1 es un movimiento fuera del rango y 0 no. # steps\step_reglas.py:50.

• **Scenario Outline:** verifica si el movimiento está fuera del rango de la matriz. -- @1.5 fuera_del_rango_matriz # peatones.feature:35.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

• **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento está dentro de la matriz definida. Como ejemplo, para la matriz (0,0,0,1,1,0,1,1) donde se mueve el peatón, la posición 0,0 del peatón y los valores de movimiento en (1,1). # steps\step_reglas.py:34.

• **Then:** se determina que el peatón en la posición 0,0 con movimiento en (1,1), tiene (0) donde 1 es un movimiento fuera del rango y 0 no. # steps\step_reglas.py:50.

En los datos expuestos se observa la ejecución de cada una de las pruebas propuestas, y se puede ver que todas las pruebas pasaron correctamente. Para ejecutar esta prueba se implementó en Python el siguiente código:

```
import Peaton

class Reglas: # Reglas de transformación del autómata.

# fueraDelRango: retorna true si los valores están fuera del rango de la matriz.

# param: matriz, posición del peatón, movimiento de "x" y "y" para la nueva posición.

# return: verdadero si el movimiento es inválido.

def fueraDelRango(self, matriz, posicion, x, y):

    # Valida que el movimiento se sale del rango de la matriz

    if ((posicion[0]+x)>(matriz["tamano"][0]-1))

    or ((posicion[0]+x)<0)

    or (posicion[1]+y>(matriz["tamano"][1]-1))

    or ((posicion[1]+y)<0)):

        return True

    return False
```

Se pudo observar que este código es bastante simple y se seleccionó con ese propósito para simplificar esta parte y explicar su implementación de BDD. A continuación, se presentan otros dos escenarios con su respectiva ejecución, los cuales son relevantes para las reglas del autómata celular.

4.5. Ejecución del escenario que verifica el avance de una celda del peatón

Se presentan los resultados de la ejecución de la prueba en BDD de la Tabla 3 y los ejemplos definidos en la Figura 5, para el escenario donde se verifica el avance de una sola celda del peatón.

Tabla 3.
Plantilla BDD. Avance de una sola celda del peatón

Parte	Descripción
Scenario Outline	Avanza un peatón una sola celda hacia adelante, si puede.
Given (Dado)	Se definen las reglas del autómata celular.
When (Cuando)	Cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón <destino> y la posición <actual> del peatón para avanzar una posición.
Then (Entonces)	Se determina que el peatón en la posición <actual>, tiene <resultado> de movimiento en el camino para un paso.

Fuente: elaboración propia.

Ejemplos: adelante_uno_movimiento

destino	actual	resultado
4,4	2,2	1,1
0,0	2,2	-1,-1
0,4	2,2	-1,1
4,0	2,2	1,-1
2,0	2,2	0,-1
2,5	2,2	0,1
0,2	2,2	-1,0
5,2	2,2	1,0

Figura 5. Ejemplos escenario de avance de una sola celda del peatón
Fuente: elaboración propia.

- **Scenario Outline:** avanza un peatón una sola celda hacia adelante, si puede. -- @1.1 adelante_uno_movimiento # peatones.feature:67.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 4,4 y la posición 2,2 del peatón para avanzar una posición. # steps\step_reglas.py:76.

- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (1,1) de movimiento en el camino para un paso. # steps\step_reglas.py:89.

- **Scenario Outline:** avanza un peatón una sola celda hacia adelante, si puede. -- @1.2 adelante_uno_movimiento # peatones.feature:68.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 0,0 y la posición 2,2 del peatón para avanzar una posición. # steps\step_reglas.py:76.

- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (-1,-1) de movimiento en el camino para un paso. # steps\step_reglas.py:89.

- **Scenario Outline:** avanza un peatón una sola celda hacia adelante, si puede. -- @1.3 adelante_uno_movimiento # peatones.feature:69.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 0,4 y la posición 2,2 del peatón para avanzar una posición. # steps\step_reglas.py:76.

- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (-1,1) de movimiento en el camino para un paso. # steps\step_reglas.py:89.

- **Scenario Outline:** avanza un peatón una sola celda hacia adelante, si puede. -- @1.4 adelante_uno_movimiento # peatones.feature:70.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 4,0 y la posición 2,2 del peatón para avanzar una posición. # steps\step_reglas.py:76.

- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (1,-1) de movimiento en el camino para un paso. # steps\step_reglas.py:89.
- **Scenario Outline:** avanza un peatón una sola celda hacia adelante, si puede. -- @1.5 adelante_uno_movimiento # peatones.feature:71.
- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.
- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 2,0 y la posición 2,2 del peatón para avanzar una posición. # steps\step_reglas.py:76.
- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (0,-1) de movimiento en el camino para un paso. # steps\step_reglas.py:89.
- **Scenario Outline:** avanza un peatón una sola celda hacia adelante, si puede. -- @1.6 adelante_uno_movimiento # peatones.feature:72.
- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.
- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 2,5 y la posición 2,2 del peatón para avanzar una posición. # steps\step_reglas.py:76.
- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (0,1) de movimiento en el camino para un paso. # steps\step_reglas.py:89.
- **Scenario Outline:** avanza un peatón una sola celda hacia adelante, si puede. -- @1.7 adelante_uno_movimiento # peatones.feature:73.
- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.
- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 0,2 y la posición 2,2 del peatón para avanzar una posición. # steps\step_reglas.py:76.
- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (-1,0) de movimiento en el camino para un paso. # steps\step_reglas.py:89.
- **Scenario Outline:** avanza un peatón una sola celda hacia adelante, si puede. -- @1.8 adelante_uno_movimiento # peatones.feature:74.
- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.
- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 5,2 y la posición 2,2 del peatón para avanzar una posición. # steps\step_reglas.py:76.
- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (1,0) de movimiento en el camino para un paso. # steps\step_reglas.py:89.

4.6. Ejecución del escenario avanza un peatón dos celdas hacia adelante

A continuación, se presentan los resultados de la ejecución de la prueba en BDD de la Tabla 4 y los ejemplos definidos en la Figura 6, para el escenario donde se verifica el avance de dos celdas hacia adelante del peatón. Resultado de la ejecución de la prueba.

Tabla 4.
Plantilla BDD. Avanza un peatón dos celdas hacia adelante

Parte	Descripción
Scenario Outline	Avanza un peatón dos celdas hacia adelante, si puede.
Given (Dado)	Se definen las reglas del autómata celular.
When (Cuando)	Cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón <destino> y la posición <actual> del peatón para avanzar dos posiciones.
Then (Entonces)	Se determina que el peatón en la posición <actual>, tiene (<resultado>) de movimiento en el camino para dos pasos.

Fuente: elaboración propia.

Ejemplos: adelante_dos_movimiento

destino	actual	resultado
4,4	2,2	2,2
0,0	2,2	-2,-2
0,4	2,2	-2,2
4,0	2,2	2,-2
2,0	2,2	0,-2
2,5	2,2	0,2
0,2	2,2	-2,0
5,2	2,2	2,0

Figura 6. Ejemplos escenario avanza un peatón dos celdas hacia adelante
Fuente: elaboración propia.

- **Scenario Outline:** avanza un peatón dos celdas hacia adelante, si puede. -- @1.1 adelante_dos_movimiento # peatones.feature:83.
- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.
- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 4,4 y la posición 2,2 del peatón para avanzar dos posiciones. # steps\step_reglas.py:95.
- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (2,2) de movimiento en el camino para dos pasos. # steps\step_reglas.py:108.
- **Scenario Outline:** avanza un peatón dos celdas hacia adelante, si puede. -- @1.2 adelante_dos_movimiento # peatones.feature:84.
- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.
- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 0,0 y la posición 2,2 del peatón para avanzar dos posiciones. # steps\step_reglas.py:95.
- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (-2,-2) de movimiento en el camino para dos pasos. # steps\step_reglas.py:108.
- **Scenario Outline:** avanza un peatón dos celdas hacia adelante, si puede. -- @1.3 adelante_dos_movimiento # peatones.feature:85.
- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 0,4 y la posición 2,2 del peatón para avanzar dos posiciones. # steps\step_reglas.py:95.

- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (-2,2) de movimiento en el camino para dos pasos. # steps\step_reglas.py:108.

- **Scenario Outline:** avanza un peatón dos celdas hacia adelante, si puede. -- @1.4 adelante_dos_movimiento # peatones.feature:86.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 4,0 y la posición 2,2 del peatón para avanzar dos posiciones. # steps\step_reglas.py:95.

- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (2,-2) de movimiento en el camino para dos pasos. # steps\step_reglas.py:108.

- **Scenario Outline:** avanza un peatón dos celdas hacia adelante, si puede. -- @1.5 adelante_dos_movimiento # peatones.feature:87.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 2,0 y la posición 2,2 del peatón para avanzar dos posiciones. # steps\step_reglas.py:95.

- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (0,-2) de movimiento en el camino para dos pasos. # steps\step_reglas.py:108.

- **Scenario Outline:** avanza un peatón dos celdas hacia adelante, si puede. -- @1.6 adelante_dos_movimiento # peatones.feature:88.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 2,5 y la posición 2,2 del peatón para avanzar dos posiciones. # steps\step_reglas.py:95.

- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (0,2) de movimiento en el camino para dos pasos. # steps\step_reglas.py:108.

- **Scenario Outline:** avanza un peatón dos celdas hacia adelante, si puede. -- @1.7 adelante_dos_movimiento # peatones.feature:89.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 0,2 y la posición 2,2 del peatón para avanzar dos posiciones. # steps\step_reglas.py:95.

- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (-2,0) de movimiento en el camino para dos pasos. # steps\step_reglas.py:108.

- **Scenario Outline:** avanza un peatón dos celdas hacia adelante, si puede. -- @1.8 adelante_dos_movimiento # peatones.feature:90.

- **Given:** se definen las reglas del autómata celular # steps\step_reglas.py:10.

- **When:** cuando se quiera realizar un movimiento de un peatón, se debe verificar si su movimiento es válido. Como ejemplo, dado un destino del peatón 5,2 y la posición 2,2 del peatón para avanzar dos posiciones. # steps\step_reglas.py:95.
- **Then:** se determina que el peatón en la posición 2,2, tiene (2,0) de movimiento en el camino para dos pasos. # steps\step_reglas.py:108.

4.7. Encuesta de la aceptación del uso de la metodología

Como era un primer ejercicio del uso de BDD en este tipo de proyectos, se propuso construir una encuesta sencilla como instrumento de retroalimentación en el proceso de desarrollo usando BDD (ver Tabla 5), para la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5.
Encuesta de aceptación de la metodología

Preguntas	Muy en desacuerdo	En desacuerdo	No estoy seguro	De acuerdo	Muy de acuerdo
¿Siente usted que se cumplió con los tiempos propuestos en la planeación del proyecto?	0 %	0 %	0 %	40 %	60 %
¿El modelo construido en el proyecto tuvo en cuenta todos los elementos que usted considera?	0 %	0 %	0 %	20 %	80 %
¿El modelo funciona como usted espera?	0 %	0 %	0 %	30 %	70 %
¿Está usted satisfecho con el rendimiento del proceso de la construcción del modelo?	0 %	0 %	0 %	40 %	60 %
¿En su opinión, usted obtuvo retroalimentación todo el tiempo de lo que se estaba realizando en el proyecto?	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %
¿El prototipo se podía ajustar durante el proyecto?	0 %	0 %	0 %	40 %	60 %
¿La calidad del producto es como usted lo esperaba?	0 %	0 %	0 %	30 %	70 %
¿Recomendaría usted el uso de la metodología BDD a otras personas?	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %
¿Volvería a usar BDD como metodología para el desarrollo de un futuro proyecto?	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %
¿Usted siente que hubo elementos que faltaron en la construcción del modelo?	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
¿Usted siente que el proyecto se estancaba y no avanzaba en el tiempo de ejecución?	80 %	20 %	0 %	0 %	0 %

Fuente: elaboración propia.

4.8. Ejecución del modelo

Como resultado final se presenta una de las ejecuciones del autómata celular y solo se muestra una de las ejecuciones, porque el campus de la Universidad del Valle es muy grande, siendo este el objeto de estudio para el cual se desarrolló el modelo (Vargas-Forero *et al.*, 2019). Se decidió mostrar la vía peatonal que conduce a la cafetería central, ya que está en la hora pico (al mediodía) y es la más concurrida en toda la universidad, mostrando el mayor número de peatones y congestión en la vía.

En la Figura 7 se observa la vía peatonal de la cafetería central, para esta ejecución hay 1.121 peatones que proceden de muchos orígenes, pero todos convergen al destino de la cafetería central. El tiempo de ejecución de esta imagen son 5000 ciclos, equivalente a 83,33 minutos dado que cada ciclo se asumió como un segundo en el tiempo. Se observa que los peatones fluyen sin contratiempo y de la misma forma fluyen los peatones en el resto de las vías peatonales.

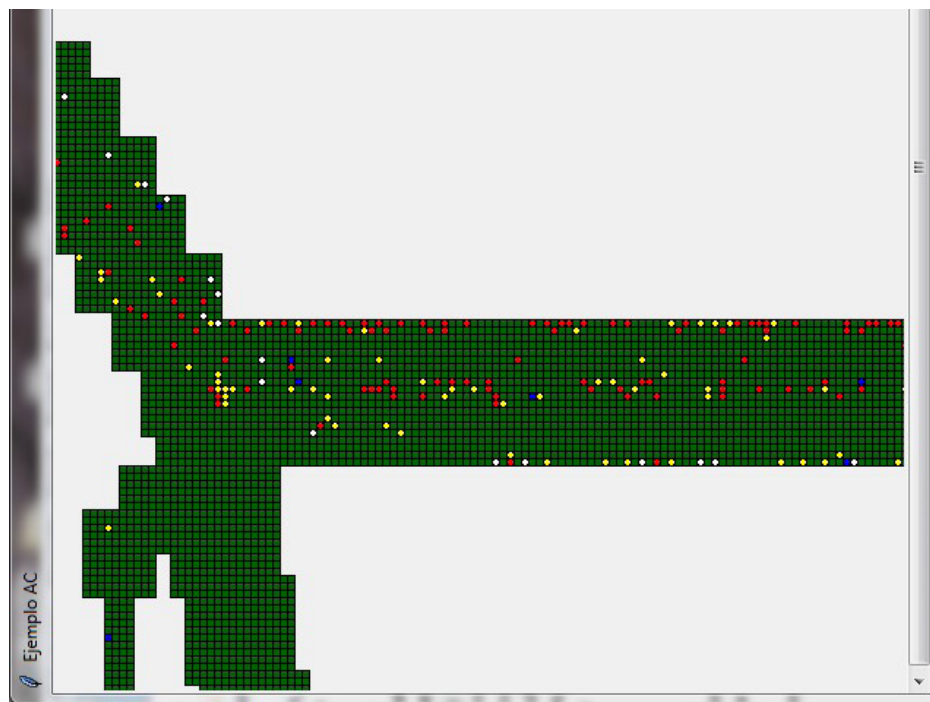


Figura 7. Ejecución del autómata celular con 1121 peatones y 5000 ciclos
Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Al momento del desarrollo del proyecto no se evidenció en la literatura el uso de BDD en aplicaciones de simulación de movimiento peatonal y menos con el uso de autómatas celulares, por tanto, se considera oportuna la construcción del primer modelo de autómata celular para una simulación de movimiento peatonal con el uso de BDD.

Al ser la primera implementación conocida con el uso de BDD una de las mayores expectativas alrededor de ella, los tiempos esperados o las características solicitadas no se cumplieron, sin embargo, al finalizar el proyecto se evidenció que dichos tiempos fueron adecuados y suficientes para los usuarios que solicitaron el software. El análisis y la especificación de los requisitos del proyecto se desarrollaron de forma natural para las personas que participaron en el proyecto, considerando que no contaban con formación en informática o sistemas. Gracias a la realización de pruebas continuas, el control de calidad del producto se pudo realizar de manera exitosa, rápida y eficiente.

En las etapas de la construcción, donde se encontró la necesidad de realizar cambios por nuevas características o modificaciones en el proyecto, la implementación e integración en el proceso de desarrollo se facilitó gracias a que dichas modificaciones no tuvieron impacto desfavorable en el producto, no hubo afectación en los tiempos ni tampoco en la calidad del producto. Como se puede evidenciar en la encuesta de aceptación acerca del uso de la metodología, los usuarios que participaron en el desarrollo mostraron una elevada aceptación en el uso la misma, dado que, por ejemplo, ninguna pregunta generó ambigüedad o incertidumbre para la respuesta del usuario; así mismo, la totalidad de respuestas se encontraron en los rangos de mayor aceptación (De acuerdo y Muy de acuerdo ó en Desacuerdo y Muy en desacuerdo), según la orientación de la pregunta.

La aplicación de BDD en proyectos de investigación podría resultar ser amplia y variada, sobre todo con implementaciones formales. Un ejemplo de futuras aplicaciones lo puede constituir Evento-B, donde se pueda realizar la transición de un documento de requisitos a una especificación formal.

6. Referencias

- Beck, Kent; Beedle, Mike; Bennekum, Arie; Cockburn, Alistair; Cunningham, Ward; Fowler, Martin;... Thomas, Dave (2001). *Agilemanifesto*. Manifiesto por el Desarrollo Ágil de Software. Recuperado de <https://agilemanifesto.org/iso/es/manifesto.html>
- Buitrago, Pablo; Kattán, José (2011). *Universidad del Valle arquitectura para la educación*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Chen, Bi; Wang, Yafei; Wang, Donggen; Li, Qingquan; Lam, William; Shaw, Shih (2018). Understanding the impacts of human mobility on accessibility using massive mobile phone tracking data. *Annals of the American Association of Geographers*, 108(4), 1115–1133.
<https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1411244>
- Engel, Jens; Rice, Benno; Jones, Richard (2012). *Behave*. Recuperado de <https://behave.readthedocs.io/en/latest/>
- Ferguson-Smart, John (2014). *BDD in Action: Behavior-Driven Development for the whole software lifecycle*. Manning Publications.
- Gipps, P. G.; Marksjö, B. (1985). A micro-simulation model for pedestrian flows. *Mathematics and Computers in Simulation*, 27(2–3), 95–105.
[https://doi.org/10.1016/0378-4754\(85\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0378-4754(85)90027-8)
- Gudowski, Bartłomiej; Waś, Jarosław (28-30 de junio de 2007). Some criteria of making decisions in pedestrian evacuation algorithms. En *6th International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management Applications, CISIM 2007* (pp. 93–96), Minneapolis, MN, USA.
<https://doi.org/10.1109/CISIM.2007.61>
- Jurado, Carlos (2010). *Diseño Ágil con TDD*. Lulu.com.
- Khamis, Abdelaziz; Abdelmonem, Ashraf (2002). The unified software development process and framework. *Dogus University Dergisi* 5, 109-122.
<https://doi.org/10.31671/dogus.2019.348>
- Martins-Gonçalves, Natalia; Nuñez-Basantes, Alba (2017). Assessment the pedestrian accessibility in the brt stations in two cities of Latin America (breakout presentation). *Journal of Transport & Health*, 7(Supplement), S76–S77.
<https://doi.org/10.1016/j.jth.2017.11.124>
- Muñoz Ceballos, L. E. (2017). *Herramienta para modelar la accesibilidad peatonal al interior del campus de la Universidad del Valle con autómatas celulares sobre una plataforma SIG*. Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- North, D. (2006). Introducing {BDD}. Retrieved January 12, 2019, from Better Software Magazine website: <https://dannorth.net/introducing-bdd/>
- Poppendieck, Mary; Cusumano, Michael (2012). Lean Software Development: A Tutorial. *IEEE Software*, 29(5), 26–32.
<https://doi.org/10.1109/MS.2012.107>

- Qin, Han; Curtin, Kevin; Rice, Matthew (2018). Pedestrian network repair with spatial optimization models and geocrowdsourced data. *GeoJournal*, 83(2), 347–364.
<https://doi.org/10.1007/s10708-017-9775-x>
- Schadschneider, A. (2001). *Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics - Theory* (p. 75). p. 75. Springer 2001.
- Solis, Carlos; Wang, Xiaofeng (2011). A Study of the Characteristics of Behaviour Driven Development. En *37th EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications* (pp. 383–387), Oulu, Finland.
<https://doi.org/10.1109/SEAA.2011.76>
- Vargas-Forero, Victor; Muñoz-Ceballos, Luz; García-Baños, Ángel; Jaramillo-Molina, Ciro (2019). Modelo con autómatas celulares para analizar la accesibilidad peatonal al interior del campus universitario meléndez de la Universidad del Valle. *Scientia et Technica*, 24(1), 67–75.
- Was, J. (8-10 septiembre de 2005). Cellular automata model of pedestrian dynamics for normal and evacuation conditions. En *5th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications 2005, ISDA '05* (154–159), Warsaw, Poland.
<https://doi.org/10.1109/ISDA.2005.31>
- Wolfram, M. (2019). *Moore Neighborhood*. Retrieved October 10, 1BC, from MathWorld Team website:
<http://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html>.

Fractional order control for bidirectional converter operating in a DC microgrid

Control de orden fraccionario para un convertidor bidireccional operando en un microrred DC

César Trujillo-Rodríguez¹
Johan Sánchez-Choachi²
Giovanni Baquero-Rozo³

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia). Correo electrónico: cltrujillo@udistrital.edu.co; orcid: <http://orcid.org/0000-0002-0985-1472>

² Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia). Correo electrónico: jossanchezc@correo.udistrital.edu.co; orcid: <http://orcid.org/0000-0002-1945-5975>

³ Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Correo electrónico: gabaqueror@unal.edu.co; orcid: <http://orcid.org/0000-0003-3789-2244>

Recibido: 11-09-2019 Aceptado: 16-12-2019

Cómo citar: Trujillo-Rodríguez, César; Sánchez-Choachi, Johan; Baquero-Rozo, Giovanni (2020). Fractional order control for bidirectional converter operating in a DC microgrid. *Informador Técnico*, 84(1), 67-77. <https://doi.org/10.23850/22565035.2387>

Abstract

This paper presents the control design of a bidirectional converter used to support a DC microgrid. The chosen topology for this purpose is the bidirectional buck-boost converter, for which its mathematical model is obtained. Next, a brief introduction of fractional order control is presented and the structure of a fractional order PID controller is shown. The tuning process of this controller is obtained by means of an arithmetic method whose parameters are set to control the bidirectional converter. In order to evaluate the performance of the converter and its fractional-order controller, this is simulated under different situations that represent different operating conditions, such as changes in battery voltage levels, climatic conditions, and uncertainty in the parameters. The simulation results of this controller are analyzed and compared with a classical PID. Finally, the conclusions are presented.

Keywords: bidirectional converter; DC microgrid; fractional-order control; robustness.

Resumen

Este artículo presenta el diseño del control de un convertidor bidireccional el cual es usado para brindar soporte eléctrico a una microrred DC. La topología elegida para este propósito es un convertidor bidireccional Buck-boost, para el cual se obtiene el modelo matemático. A continuación se presenta una breve introducción al concepto de control de orden fraccionario, en donde se muestra la estructura de un PID de orden fraccionario. Luego se muestra el proceso de sintonización de los parámetros de este controlador usando un método aritmético. Con el objetivo de evaluar el desempeño del convertidor y su controlador de orden fraccionario, se simula bajo diferentes situaciones que representan distintas condiciones de operación, tales como cambios en los niveles de tensión de la batería, condiciones climáticas e incertidumbre en los parámetros. Se analizan y comparan los resultados de simulación del controlador con los obtenidos de un PID clásico. Finalmente, se presentan las conclusiones.

Palabras clave: convertidor bidireccional, control de orden fraccionario, microrred DC, robustez.

1. Introduction

Currently, distributed generation systems (DG) such as wind and PV farms, have received great attention worldwide as an effective solution for problems such as the increasing of the load factor, which could reach the current limit capacity of power systems (Lee; Kang; Park, 2016). In addition, DGs offer great technical and economic benefits, but the unification of several electric features into a single unit is needed (Perez; Kagan, 2016). This kind of unit is called microgrids. These systems are electric power grids confined locally and whose purpose is to integrate alternative energy sources with the loads, making stable and efficient systems (Krishnamurthy; Kwasinski, 2016). Until now, AC microgrids are the most common ones, however, low and medium DC power distribution systems, used in telecommunication systems and electric vehicle (EV) charging infrastructures as shown in Figure 1, are widely used because they do not have problems of synchronism and harmonic distortion (Sirsi; Prasad; Sonawane; Lokhande, 2016). In the study of Manandhar; Ukil and Jonathan (2015) is presented the DC and AC systems modeling including their power converters, power cable losses and loads. Then, these systems are simulated, finding efficiency of 78.24 % and 84.6 % for low voltage AC and DC systems respectively. This shows that the efficiency of the DC systems is higher than the AC systems under some conditions (Lee *et al.*, 2016), which makes DC grids more efficient systems.

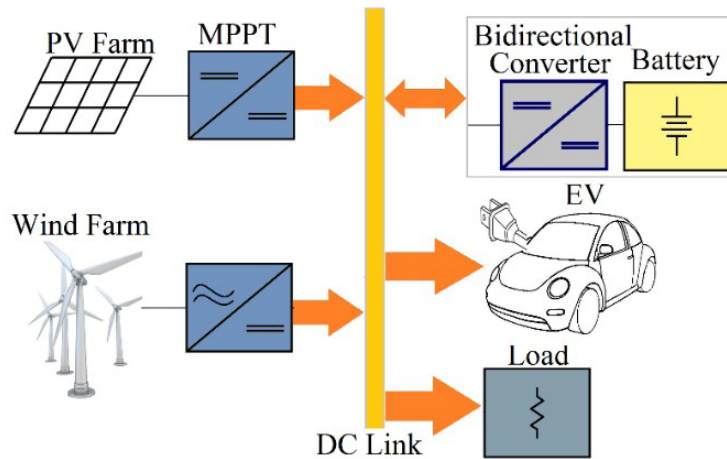


Figure 1. General microgrid scheme
Source: authors.

A lot of DC microgrids include photovoltaic and wind power sources, which dependent on weather conditions, resulting in power fluctuations that affect the power flow between the sources and the load (Alam; Muttaqi; Sutanto, 2013; Takagi *et al.*, 2013; Tamura, 2016) and the hybrid energy storage system (HESS). Additionally, changes in load and generation levels lead to voltage disturbances in the DC link. These changes affect the power quality managed by the microgrid and produce malfunction of devices and loads connected to it. For these reasons, it is necessary to include an energy storage system with bidirectional DC-DC converters to ensure energy storage when there is a surplus or delivery it when the sources cannot give enough energy to the loads. However, these converters must meet some requirements, and one of them is high efficiency. Another requirement is to respond quickly to any voltage level fluctuation on the DC link and any other disturbance (Tummuru; Mishra; Srinivas, 2015). There are several topologies such as dual active bridge and bidirectional flyback, which offer galvanic isolation and high energy density. Another group of topologies is the non-isolated converters, where the most common ones are: zeta, zepic, cuck/cuck, and buck-boost topologies. Nevertheless, this last group does not have high-frequency transformers and does not offer high energy density. Moreover, this converter has low voltage gain, although some modified versions can be found in academic literature. One example of this is the buck-boost modified converter propose in Banaei and Sani (2018), which structure contains only one switch and, unlike many other DC converters, has low stress across the only switch. Notwithstanding, owing to this topology is not bidirectional, it is needed to connect the two voltage levels by two converters, one for each power flow direction.

One of the most used controllers is the PID controller owing to its simplicity and good performance. However, other controllers such as a fuzzy logic controller, adaptive or predictive controller can offer better performance but have a more complex structure. Thus, it is necessary to compare performance with complexity and then to choose the better option. Some works have tackled this issue from different perspectives, which is one of them the passivity control used in Montoya-Giraldo; Garcés-Ruiz; Ortega-Velázquez; Espinosa-Pérez (2018). However, passivity control in itself is not robust which means it is sensible to perturbations in the system. For this, additional strategies have to be added to control passivity to allow an acceptable performance of the converter in real conditions. In Sanchez-Choachí (2019) an adaptive strategy is used to improve the passivity control performance, and additionally, instead of controlling the battery current as in Montoya *et al.*, (2018), the output voltage is regulated indirectly to keep the DC voltage at the reference level.

Fractional order control (FOC) is one of the control techniques whose structure is similar to PID's, but it has additional parameters. Nevertheless, it is simpler than others like compensation nets, fuzzy controllers, among others. Other significant advantages are higher robustness level and ease of design. For this reason, this kind of controllers is used in mechanical, automatic, thermal and pressure areas (Kanagaraj; Al-Dhaifalla; Nisar, 2017). Until now, there are three fractional order control generations, where the first-generation control is the simplest, and it is the one used in this paper. In some studies like Lei; Xiong; Lei (2017), FOCs are applied to different converters; however, none of them are applied to a bidirectional converter.

This paper presents the modeling of a bidirectional buck-boost converter and develops its fractional order controller (FOC). The tuning detailed process of this FOC is shown with all its numeric parameters. Then, this FOC is approximated using linear filters. Next, the converter and the designed FOC are simulated for different operating conditions. These simulation results are compared with a classical PID controller. Finally, the conclusions about the design process and the outcomes of this work are shown.

2. Converter modeling

As was mentioned previously, there are a lot of conversion topologies that raise or reduce the voltage level between its output terminals. One of these topologies is the buck-boost converter, shown in Figure 2. In this figure, i_p is the current generated by the microgrid sources, E is the battery voltage, v_c is the capacitor voltage which is the DC link voltage too, i_L is the current across the inductor (L) and R_{DC} is the grid load. The current (i_p) represents the grid sources, whose current value can change in order to simulate different weather conditions. Additionally, R_s are included to represent generation and conversion losses.

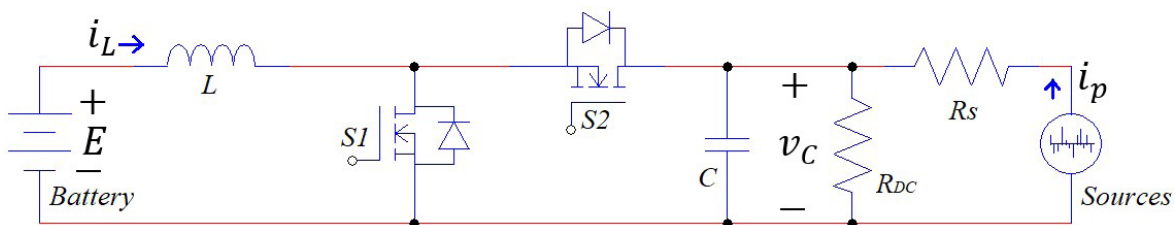


Figure 2. Bidirectional Buck-boost topology
Source: Authors.

This topology is typically used for low voltage applications due to its low ratio conversion. However, this converter can be used for high voltage applications using it to build a modular multilevel converter by means of using methodologies as proposed in Kung and Kish (2018). This methodology apportions the semiconductor devices into switching cells (with $n \geq 2$), then using a harmonic power balance concept, the direction of average ac power flow is identified. Once this is done, the original cells are replaced with new switching cells comprised of series/cascaded subsystems that allow the required ac power flow. Finally, the fundamental frequency ac currents are canceled by interleaving multiple strings subsystems. In fact, the aforementioned methodology is used on the buck-boost converter yielding a new topology.

The buck-boost bidirectional power converter operates as a boost converter if the power flows from the battery to the DC link and operates as a buck converter if the current goes from the DC link to the battery. For this reason, v_c voltage must be larger than E . Another restriction of this converter is that $S1$ and $S2$ diodes have to be fast recovery to avoid working failures since the $S2$ diode works when the current goes from E to v_c and $S1$ diode operates in the opposite case. Therefore, slow current or voltage transitions affect the converter efficiency and behavior (Chun; Rui; Hongwen; Xiaofeng; Weixiang, 2016).

The mathematical model of this converter is developed by assuming that the system is operating in a stationary point so v_c has a constant value. Moreover, the voltage drop in the diode (v_d) is included to consider electrical losses in the model. Then, the average model of the buck-boost converter is obtained by evaluating the state of $S1$ and $S2$ and remembering that these states are opposite, which means that if $S1$ is open then $S2$ is closed and vice versa. This mathematical model is shown in equation (1), where u is the period percentage in which $S1$ is closed. This variable is known as the duty cycle.

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} &= E - v_c(1 - u) - v_d(1 - u) \\ C \frac{dv_c}{dt} &= i_L(1 - u) - i_p - \frac{v_c}{R_{DC}} \end{aligned} \quad (1)$$

3. Fractional order control

This kind of control is similar to traditional linear controllers, but instead of using traditional calculus, it uses the fractional order calculus. This calculus, developed by Riemann and Liouville, is a generalization of the differentiation concept, where its order can be a real number or even a complex number. The differentiation operator can be represented by the operator D_a which is defined by the equation (2) when it operates over a generic function $f(t)$. In this equation, $a \in \mathbb{R}$ is the fractional-order and it is in the numeric interval $(n, n + 1)$, being n the closest integer to a (but $n < a$) (but) and Γ is the gamma function.

$$C_{FO} = k_p + \frac{k_I}{S^\alpha} + k_D S^\beta = \frac{k_p S^\alpha + k_I + k_D S^{\beta+\alpha}}{S^\alpha} \quad (2)$$

The equation (2) is known as Cauchy's formula. If initial conditions are assumed zero, this formula represents the $f(t)$ repeated integral of order n by means of a unique integral pondered by the gamma function. With this representation, the integration and derivative concept can be generalized and take a fractional order. Initially, this concept only had mathematical worth because its physical meaning was not considered since physical laws are understood from integer order calculus. Nevertheless, recent research has shown fractional-order calculus is useful to model complex liquids, thermal processes, mechanical systems, signal and image processing and materials (Sun; Zhang; Baleanu, Chen; Chen, 2018).

Using equation (2) to incorporate fractional order calculus in control theory, some common tools can be improved. For instance, in the Laplace domain, the generalized structure of a fractional order PID (FOPID) is given by the equation (3), where k_p , k_I and k_D are the proportional, integral and derivative gains respectively and α and β are the fractional orders of the derivative and integration operator. These two new parameters, that PID controllers do not have, allow us to control more system response features that could improve the plant's behavior, maintaining a simple control structure.

$$C_{FO} = k_p + \frac{k_I}{S^\alpha} + k_D S^\beta = \frac{k_p S^\alpha + k_I + k_D S^{\beta+\alpha}}{S^\alpha} \quad (3)$$

Unfortunately, fractional order controllers have infinite dimensions, so, an approximation using linear filters is needed to implement an FOC. This approximation can be developed by different methods; however, the simplest one is the CRONE (Non-Integer Order Robust Control) approximation. The first step of this approximation is restricting the frequency band on which the designed FOC operation is required (from ω_h to ω_b). Next, poles and zeros corner frequencies (ω_k and $\tilde{\omega}_k$ respectively) have to be distributed in order to emulate the FOC behavior. This approximation is represented by equation (4) and it is the product of N poles and N zeros, where the number of linear filters (N) is chosen as is shown by equation (5).

$$D_a^\alpha(s) = C \left(\frac{1 + \frac{S}{\omega_h}}{1 + \frac{S}{\omega_b}} \right)^\alpha \approx C \frac{\prod_{k=1}^N \left(1 + \frac{S}{\tilde{\omega}_k} \right)}{\prod_{k=1}^N \left(1 + \frac{S}{\omega_k} \right)} \quad (4)$$

The corner frequencies ω_k and $\tilde{\omega}_k$ must be distributed recursively to obtain the required frequency behavior and to approximate the FOC performance. However, there is a numeric method used to determinate each ω_k and $\tilde{\omega}_k$. This method is an iterative process described by the equation (5), where once the first converter frequency (ω_1) is defined, the other frequencies are established.

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_1 &= \alpha \omega_1 & \omega_1 &= \mu^{0,5} \omega_b \\ \tilde{\omega}_{k+1} &= \alpha \mu \tilde{\omega}_k & \omega_{k+1} &= \alpha \mu \omega_k \\ \mu &= \frac{\log(\alpha)}{\log(\alpha \mu)} & N &= \frac{\log(\omega_h / \omega_b)}{\log(\alpha \mu)} \end{aligned} \quad (5)$$

The number of linear filters (N) has to be approximated the closest integer, but less than the indicated value by equation (5). However, because of the infinite dimension of the FO controller, the larger is, the better is the approximation to FO controller behavior. So, if increasing the number of linear filters is desired, ω_1 has to be closer to ω_b .

4. Control design

It is possible to find several tuning methods such as Grunwald-Letnikov or Matsuda approximation, but this paper uses the analytic method described below. This method is based on four parameters: phase margin, φ_m , gain margin, g_m , gain crossover frequency, ω_c , phase crossover frequency, ω_p , and phase flatness. According to the system needs, the above parameters are set and by using the equations (6), the k_p , k_i , k_d , and β values are established.

$$\begin{aligned} k_p + \frac{k_i e^{-j\alpha\pi/2}}{\omega_c^\alpha} + k_d \omega_c^\beta e^{j\beta\pi/2} &= \frac{e^{j(-\pi + \varphi_m - \text{Ang}(G(j\omega_c)))}}{|G(j\omega_c)|} \\ k_p + \frac{k_i e^{-j\alpha\pi/2}}{\omega_p^\alpha} + k_d \omega_p^\beta e^{j\beta\pi/2} &= \frac{e^{j(-\pi - \text{Ang}(G(j\omega_p)))}}{g_m |G(j\omega_p)|} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\left. \frac{d(C_{FO} G)}{d\omega} \right|_{\omega_s} = 0$$

By linearizing the equation (1) around its equilibrium point, the equation (7) is developed. This equation is the converter transfer function that relates the duty cycle (u) to the output voltage, being this the controlled variable. V_{Ce} is the equilibrium point of the output voltage, which is 220 V in this case, i_{Le} is the equilibrium value of the current across the coil, u_e is the nominal value of the duty cycle to get an output voltage equal to 220 V from input voltage $E = 120$ V.

$$G(s) = \frac{v_C(s)}{u(s)} = \frac{V_{Ce}(1-u_e)-s(i_{Le}L)}{s^2LC + s\frac{L}{R_{DC}} + (1-u_e)^2} \quad (7)$$

The output capacitor (C) is a key element in the converter and as is evident from the equation (7), the transfer function of this system is sensitive to C changes. In order to show this converter sensitivity, Figure 3 presents the bode plot of equation (7) for three different values of C , namely, 80 μ F, 100 μ F and, 120 μ F. As can be seen on the right side of this figure, around f_c (gain crossover frequency), the converter phase is almost constant whereas its magnitude is uncertain, which makes the converter has different bandwidths.

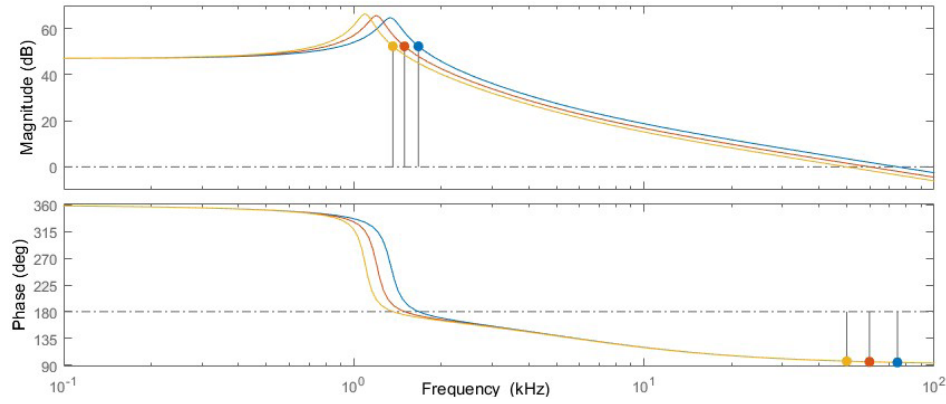


Figure 3. Converter Bode plot for different capacitance values
Source: authors.

In this figure, the red curve is the transfer function of the nominal plant ($C=100 \mu$ F). This feature makes the converter a suitable system for first-generation CRONE control since despite its bandwidth varies, its phase keeps almost constant in the same frequency range. This is the reason why only capacitance changes are considered since if inductance changes are considered, the system's Bode plot shows bandwidth variations as well as phase variations around the frequency of interest.

Subsequently, the converter is designed to operate in continuous conduction mode (5 % current ripple, 2 % output voltage and power equal to 4.4 kW). Then, using the transfer function (7) and solving the equation (6), the FOPID is tuned. Table 1 has the converter and FOPID parameters obtained after the design process described above. In this table, the capacitance is set at the nominal value, however, this value varies by 20 % in the simulation.

The converter, its FO controller approximation and the general scheme of connections are shown in Figure 4. In this figure, the error signal (e) is the result of the difference between the output and reference voltage, and then this signal is applied to the FOPID comprised by the transfer functions of the equation (4). The FOPID generates the duty cycle and then given it to the converter.

Table 1.
Converter and controller
parameters

Parameter	Value
$L[\mu\text{H}]$	50
$C[\mu\text{F}]$	100
$R[\Omega]$	11
k_p	0.11
k_i	0.00023
k_D	0.044
α	1.2
β	0.6
$\Phi_{m[\circ]}$	60
$g_{m[\text{dB}]}$	18
$E[\text{V}]$	120
$v_c [\text{V}]$	220
N	3

Source: authors.

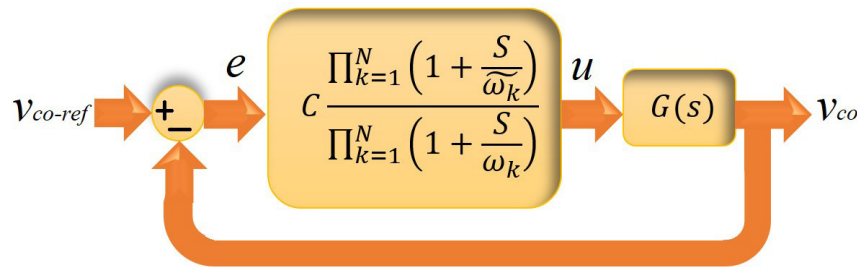


Figure 4. FOPID Control scheme
Source: authors.

5. Simulation results

Once the converter and the controllers have been designed, the simulation of the bidirectional converter is developed by using PSIM software with a switching frequency equal to 25 kHz. In this simulation, the FOC is implemented using the approximation of the equation (4) with $N = 3$ given by equation (5). In the first simulation situation, the microgrid sources are disconnected (thus $i_p = 0$ and the power is provided by the battery) and the reference voltage (equal to DC link voltage) takes three different values, namely, 200 V, 220 V, and 240 V.

As is shown in Figure 5, both FOC and PID controller, have fast response without overshoots. However, FOC has a settling time of 0.006 s whereas PID settling time is equal to 0.011 s.

In the second case, battery voltage changes as a consequence of its state of charge variation. This situation is simulated changing the E voltage, taking values within 100 V and 140 V, which means a tolerance around 17 %. This tolerance of the battery voltage is from its state of charge varying from 15 % to 100 %, the percentage recommended for lead-acid batteries. Additionally, in this case, in order to evaluate the converter robustness level, its capacitance value was changed to 80 μF .

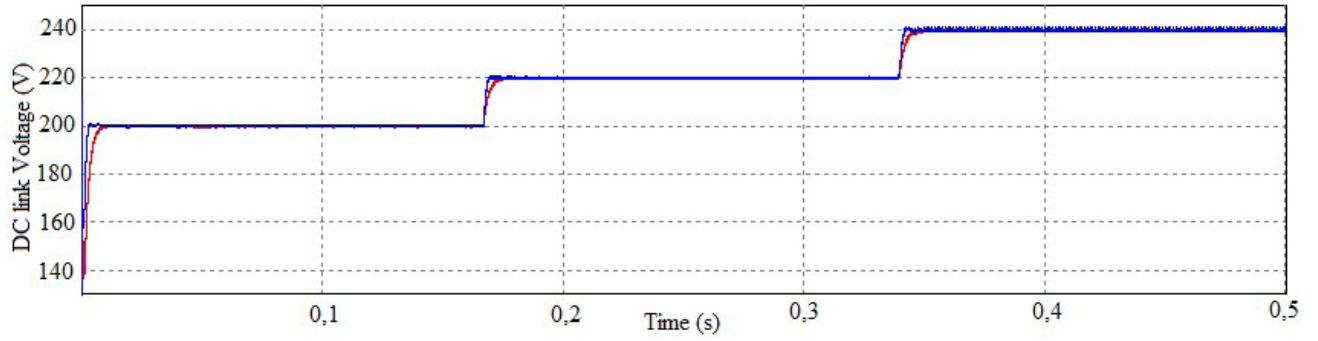


Figure 5. Converter output voltage with PID (red) and with FOC (blue) for different references
Source: authors.

Figure 6 shows the system response with the changes described previously. In this figure, each battery voltage transition takes 1 ms and the settling time of the system is around 24 ms. For these battery voltage changes, the bidirectional converter response has an overshoot without oscillations that fades away after some time. Furthermore, if the output voltage of Figure 6 is compared with Figure 5, it is evident that for figure 6 the ripple voltage is larger. This is because the capacitor has a lower value; however, the converter stability is maintained.

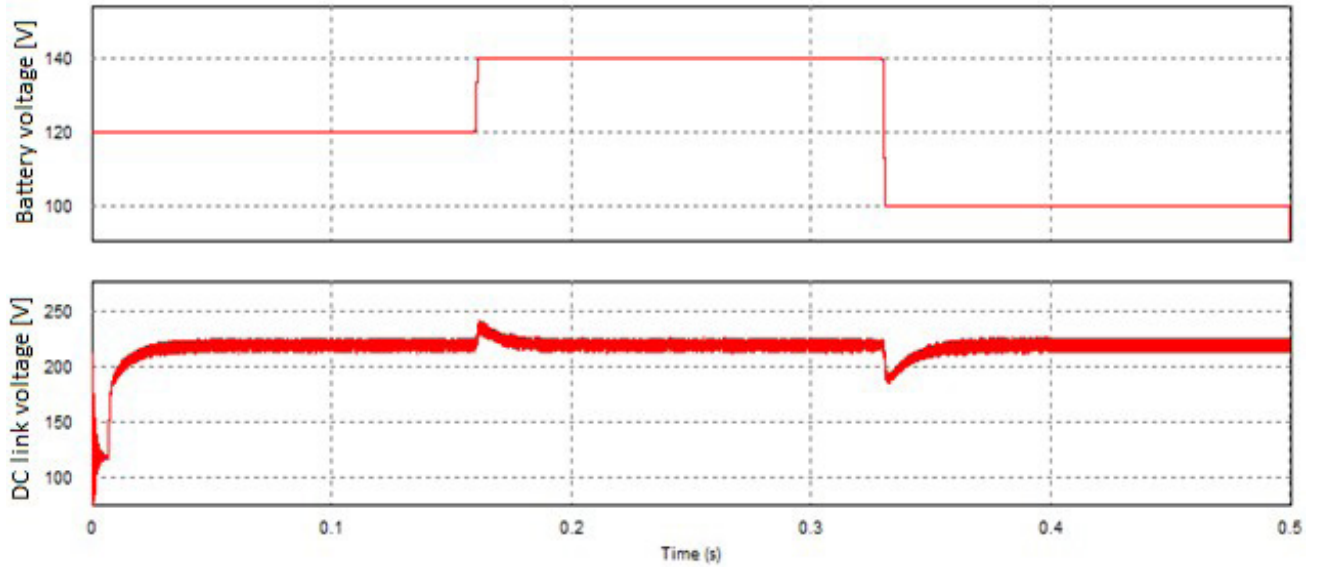


Figure 6. Battery voltage (up) and DC link voltage (down)
Source: authors.

For the third simulation situation, the reference voltage of the converter remains constant at 220 V while the current of the sources varies from 0 A to 20 A. This aims to simulate different weather conditions like solar radiation and wind variations that produce power changes. Figure 7 presents the results of this situation. In this figure the converter load and source currents are shown for 5 different generation levels. As can be seen from Figure 7, the sum of these currents is equal to zero, while the DC link voltage is constant. That means the energy surplus generated by the sources of the microgrid is stored in the battery, whereas when the sources cannot generate enough energy to supply the microgrid loads, the bidirectional power system releases the stored energy previously to give the necessary power to the loads and maintain the DC link voltage constant. This demonstrates the FOPID capacity to operate in a wide uncertainty range while the desired converter behavior is maintained and the power quality is preserved.

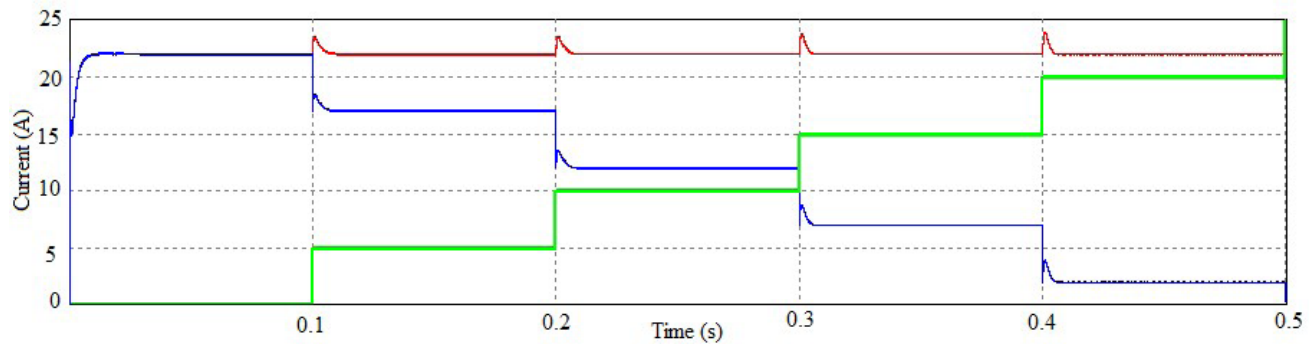


Figure 7. Load (red), ESS (blue) and sources (green) currents for different generation levels
Source: authors.

6. Conclusions

In this paper a bidirectional buck-boost converter and a FOC was designed and simulated. The FOC used in this paper is a FOPID, which has a similar structure to classical PIDs. However, as is shown in this paper, FOC has two more parameters that allow improving the converter behavior, giving fast response to reference voltage changes and parameter variation, while maintains the power quality of the DC microgrid. This means FOPID is less sensitive to variations of converter parameters than classical PID. Nevertheless, the FOPID implementation process is more complex because of its fractional order, but it can be approximated by using linear filters, in what is called as CRONE approximation.

On the other hand, the first-generation FOC is suitable for systems with gain variations and constant phase at the same frequency range. Despite not all converters have this kind of dynamic, the FOC offers a satisfactory performance and can be used in many power electronics systems.

7. Acknowledgment

This work is supported by the project entitled “Low and medium capacity battery charger with low current THD, high power factor and high efficiency for electric vehicles” sponsored by COLCIENCIAS, aims to support initiatives for the developing of novel technologies in the field of energy storage systems.

8. References

- Alam, M.; Muttaqi, K.; Sutanto, D. (2013). Mitigation of rooftop solar PV impacts and evening peak support by managing the available capacity of distributed energy storage systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4).
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2259269>
- Banaei, Mohamad; Sani, Sajad (2018). Analysis and implementation of a new SEPIC-based single-switch buck-boost DC-DC converter with the continuous input current. *IEEE transactions on power electronics*, 33(12).
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2799876>
- Chun, Wang; Rui, Xiong; Hongwen, He; Xiaofeng, Ding; Weixiang, Shen (2016). Efficiency analysis of a bidirectional DC/DC converter in a hybrid energy storage system for plug-in hybrid electric vehicles. *Applied Energy*, 183, 612-622.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.178>

- Kanagaraj, N.; Al-Dhaifalla, M.; Nisar, K. S. (6-7 July 2017). Design of intelligent fuzzy fractional-order PID controller for pressure control application. *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies, ICICICT 2017*.
<https://doi.org/10.1109/ICICICT1.2017.8342618>
- Krishnamurthy, Vaidyanathan; Kwasinski, Alexis (2016). Effects of Power Electronics, Energy Storage, Power Distribution Architecture, and Lifeline Dependencies on Microgrid Resiliency during Extreme Events. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(4).
<https://doi.org/10.1109/JESTPE.2016.2598648>
- Kung, Sunny; Kish, Gregory (2018). A modular multilevel HVDC buck-boost converter delivered from its switched-mode counterpart. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(1).
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2690635>
- Lee, Soo; Kang, Yong; Park, Jung-Wook (2016). Optimal operation of multiple DGs in the DC distribution system to improve system efficiency. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(5).
<https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2582791>
- Lei, Yang; Xiong, Hejin; Lei, Deming (2-3 Dec. 2017). Fractional Order PID Control Strategy for Modular Multilevel Converters. *Proceedings - 2017 International Conference on Industrial Informatics - Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration, ICIICII 2017*.
<https://doi.org/10.1109/ICIICII.2017.21>
- Manandhar, Ujjal; Ukil, Abhisek; Jonathan, Tan (3-6 Nov. 2015). Efficiency comparison of DC and AC microgrid. In *Proceedings of the 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT ASIA 2015*.
<https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2015.7387051>
- Montoya-Giraldo, Oscar; Garcés-Ruiz, Alejandro; Ortega-Velázquez, Isaac; Espinosa-Pérez, Gerardo (4-6 April 2018). Passivity-Based control for battery charging/discharging applications by using a buck-boost DC-DC converter. *2018 IEEE green technologies conference, GreenTech 2018*.
<https://doi.org/10.1109/GreenTech.2018.00025>
- Perez, G. A.; Kagan, N. (2016). *Integration of distributed generation in power distribution networks and its structure as an intelligent generation system*.
<https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2015.7568656>
- Sanchez-Choachi, Sebastián (2019). Control basado en pasividad con estrategia adaptativa de un sistema de almacenamiento energético para una nano-red DC. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 185-203.
- Sirsi, Rohan; Prasad, Shashikant; Sonawane, Abhishek; Lokhande, Atul (7-8 April 2016). Efficiency comparison of AC distribution system and DC distribution system in a microgrid. En *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, ICEETS 2016*.
<https://doi.org/10.1109/ICEETS.2016.7583774>
- Sun, HongGuang; Zhang, Yong; Baleanu, Dumitru; Chen, Wen; Chen, YangQuan (2018). A new collection of real-world applications of fractional calculus in science and engineering. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 64, 213-231.
<https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2018.04.019>

- Takagi, Masaaki; Iwafune, Yumiko; Yamaji, Kenji; Yamamoto, Hiromi; Okano, Kunihiko; Hiwatari, Ryoji; Ikeya, Tomohiko (2013). The economic value of PV energy storage using batteries of battery-switch stations. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(1).
<https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2210571>
- Tamura, Shigeru (2016). Economic Analysis of Hybrid Battery Energy Storage Systems Applied to Frequency Control in Power System. *Electrical Engineering in Japan (English Translation of Denki Gakkai Ronbunshi)*, 195(1).
<https://doi.org/10.1002/eej.22816>
- Tummuru, Narsa; Mishra, Mahesh; Srinivas, Srinivas (2015). Dynamic Energy Management of Renewable Grid Integrated Hybrid Energy Storage System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(12).
<https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2455063>

Negociación basada en indicadores comerciales. Caso de estudio de una empresa multinacional del sector de fórmulas infantiles

Negotiation based on commercial indicators. Case study of a multinational company in the infant formulas sector

Carlos Hernán González-Campo¹
Alexander Patiño-Serrano²
Janeth Buitrago-Botina³

¹ Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: carlos.h.gonzalez@correounivalle.edu.co;
orcid: <http://orcid.org/0000-0003-2120-8209>

² Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: alexander.patino.serrano@correounivalle.edu.co;
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1265-0361>

³ Ingredion Colombia (Colombia). Correo electrónico: janeth.buitrago@correounivalle.edu.co;
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0672-6780>

Recibido: 19-06-2019 Aceptado: 20-12-2019

Cómo citar: González-Campo, Carlos Hernán; Patiño-Serrano, Alexander; Buitrago-Botina, Janeth. (2020). Negociación basada en indicadores comerciales. Caso de estudio de una empresa multinacional del sector de fórmulas infantiles. *Informador Técnico*, 84(1), 78-99. <https://doi.org/10.23850/22565035.2387>

Resumen

Al desarrollar el proceso de negociación en algunas empresas, se convierte, dependiendo de la empresa, en un elemento que hace parte de la cultura organizacional, es decir, en un rasgo distintivo. El objetivo de esta investigación fue diseñar un modelo de negociación basado en indicadores comerciales que permitieron potencializar las estrategias de una empresa en términos de liderazgo. En esta investigación descriptiva, el caso de estudio fue una empresa multinacional del sector de fórmulas infantiles (MFI), donde se utilizaron métodos cualitativos para analizar encuestas de liderazgo, históricos de ventas, indicadores comerciales y de desempeño. Aunque en los referentes teóricos se identificaron diferentes modelos de negociación existentes, en esta investigación se concluyó que es necesario desarrollar de manera colaborativa el método a utilizar, dado que, al ser conocido por todos los integrantes del equipo desde la reflexión y la acción, puede convertirse en un procedimiento establecido para ser parte de la cultura organizacional.

Palabras clave: organizaciones; gestión del conocimiento; liderazgo; modelos de negociación; competitividad; estrategia.

Abstract

The negotiation process in some companies, by developing it becomes, depending on the company, an element that is part of the organizational culture, a distinctive feature. The objective of this research was to design a negotiation model based on commercial indicators that enabled the development of a company's strategies in terms of leadership. In this descriptive investigation, the case study was a multinational company in the infant formulas sector (MIF), where qualitative methods were used to analyze leadership surveys, sales records, commercial and performance indicators. Although in the theoretical references different negotiation models were identified, in this investigation it was concluded that it is necessary to develop in a collaborative way the method to be used, since being known by all the team members from reflection and action, it can become in a procedure established to be part of the organizational culture.

Keywords: organizations, knowledge management, leadership; negotiation model; competitiveness; strategy.

1. Introducción

La negociación es un proceso fundamental que en las empresas determina su desempeño. Los modelos, los métodos o herramientas que son utilizados por parte de las personas que conforman los equipos que tienen bajo su responsabilidad este proceso, en muchos casos no corresponden con desarrollos propios de las empresas o no son conocidos y utilizados por todos los integrantes del equipo, lo cual genera resultados diferentes, una percepción difusa por parte de los clientes y, además, no permite la consolidación de una cultura organizacional propia de las empresas.

Los procesos de globalización y la evolución de los mercados han llevado a las empresas a ser más competitivas en todos los aspectos. En este contexto, se plantea la necesidad tanto de definir criterios para medir la eficacia de las negociaciones como de transformarlas en una actividad de práctica profesional. Para una empresa la negociación es una actividad valiosa que representa las diferentes maneras para llegar a un acuerdo comercial, este proceso ha venido adquiriendo una participación creciente y central en los mecanismos para potencializar sus indicadores, bajo la premisa de que los clientes potenciales son diferentes desde muchos aspectos.

Desde el punto de vista teórico, es posible observar la existencia de distintas perspectivas, que, entre otros, han estudiado las diferencias en los procesos de negociación, que pueden estar determinadas, incluso, por aspectos organizacionales, sociales, económicos, culturales o políticos. Aunque en principio existen similitudes en las definiciones del concepto de negociación que están relacionadas con la acción de negociar, se evidencian matices que en la práctica generan impactos no en el “qué”, sino en el “cómo”, en el “cuando” y, en especial, en el “quién”. En este sentido, es posible que las empresas se enfrenten al dilema de desarrollar o no este proceso para convertirlo como uno de los pilares de la cultura organizacional, pero la competitividad actual y la búsqueda de la eficiencia las orienta a seguir ese camino.

También es importante reconocer que en esta sociedad de consumo no solo se trata de vender, pues existen más competidores con objetivos similares “ventas” y “ganancias”. En este contexto, en muchos casos, los mecanismos para satisfacer las necesidades tanto de los consumidores como de las empresas, se basan en procesos de negociación. Para ganarle a la competencia es necesario contar con un plan para satisfacer a los consumidores respetando los beneficios para las empresas, es por esta razón que se requiere el desarrollo o la adquisición de diferentes mecanismos que deben ser incorporados en los procesos de negociación.

En este contexto, en la investigación realizada se responde a la pregunta ¿Cuál puede ser el método de negociación que permita a las empresas enfrentar estos nuevos retos?, es diseñado un modelo de negociación ajustado a los requerimientos de la empresa, buscando el cumplimiento de sus objetivos al momento de liderarse una negociación, a partir de las experiencias, los criterios y las enseñanzas de las negociaciones realizadas por las personas del área comercial de la empresa multinacional del sector de fórmulas infantiles (MFI). En el momento de la investigación en la empresa se identificaron impactos positivos y negativos del proceso de negociación. Sin embargo, eran más evidentes los negativos, entre los que se identificaron: la pérdida de beneficios (empleado, empresa), la posible pérdida de ventas, la imagen errónea frente a los clientes, la fuga de conocimiento valioso a partir de la experiencia, y la no potencialización de las habilidades de negociación de las personas encargadas de este proceso al contar con una metodología determinada desde de la cultura organizacional.

Es por esta razón que la investigación descriptiva del caso de estudio es la empresa MFI, donde utilizando métodos cualitativos fueron analizadas las encuestas de liderazgo, históricos de ventas, indicadores comerciales y de desempeño, para de esta forma enfocarse en encontrar una propuesta para estandarizar el proceso de negociación en el área comercial, buscando optimizar los tiempos de respuesta, mejorar la efectividad y la rentabilidad. El valor agregado consiste en identificar los factores dominantes del grupo comercial de la empresa, analizando las características principales que ayuden a mejorar el desempeño del líder, potencializando las habilidades que ya son fuertes y desarrollando aquellas donde hay debilidades. En el momento de la investigación, no existía una metodología unificada de negociación, cada individuo ejercía su propio modelo según su criterio, lo que dificultaba medir la eficacia de los resultados obtenidos, dado que no existen parámetros cualitativos considerados como importantes al alcanzar el objetivo, “la negociación”.

La estructura de este artículo corresponde con la presentación de los resultados de la investigación realizada, y consta de una primera parte que representa el marco teórico desarrollado desde la descripción de los fundamentos de la negociación y su evolución teórica desde diferentes perspectivas que dan como resultado el estado del arte; en la segunda parte es definida la metodología de la investigación; en la tercera son expuestos y argumentados los resultados del estudio de caso, centrados en la formulación del modelo propuesto. Finalmente, a modo de discusión o de conclusiones derivadas de la investigación, son presentadas varias ideas que incluyen los límites de la investigación; sobre este aspecto es importante reconocer los límites teóricos, los del caso de estudio elegido, los metodológicos y los del contexto, que permitirán nuevos retos de investigación en el futuro.

2. Marco teórico

Los orígenes de la negociación están asociados a la evolución de la humanidad, aunque es posible encontrar diferentes definiciones conceptuales, algunas asociadas a la estrategia, otras a la guerra y otras a la resolución de conflictos. Para esta investigación, por el proceso y en el contexto donde se realiza, hay una asociación más orientada por definiciones como la identificada en Pérez-Hernández (2003), “la negociación es el intercambio por medio de la palabra, del lenguaje, que elimina la forma violenta de transferencia” (p.19), este intercambio requiere de un lugar (para negociar), de los sujetos (de la negociación), del fin (que se persigue) y de los medios (para lograr el objetivo).

El contexto de esta investigación está determinado por las negociaciones comerciales con referentes internacionales, donde el centro del proceso no es ni el lugar ni el fin ni los medios, sino el sujeto negociador. Es por esta razón, que el marco teórico se delimita en revisar perspectivas y modelos que desde la teoría han estado orientados al estudio del negociador y su rol en el intercambio. Esta delimitación es importante dado que, al realizar una búsqueda del concepto de negociación en bases de datos, como *Scopus* (por tener un referente de una base de datos de calidad), se encuentran más de 70.000 documentos.

En la Tabla 1 se presenta el estado del arte desarrollado en el marco de esta investigación, basado en artículos publicados en revistas científicas con mayor impacto en los últimos 20 años, que son el resultado de investigaciones que han abordado a la negociación como un proceso que tiene como centro el negociador.

Tabla 1.
Estudios sobre el negociador como centro del proceso

Autores	Descripción
Jeive y Saner (2019)	La teoría de la negociación se aplica a las fusiones y adquisiciones concretas como negociaciones, así como a otras formas de negociaciones de alianzas estratégicas, por ejemplo, entre gobiernos, entre empresas del sector privado y negociaciones de alianzas intersectoriales, entre actores del sector privado y otros actores como los gobiernos. Se ha prestado especial atención al análisis de la diplomacia empresarial y el desarrollo de la confianza.
Sandvik; Croucher; Gooderham (2019)	Los procesos de negociación exitosos tanto dentro de los grupos de trabajo como entre los grupos y la administración, están asociados con resultados organizacionales positivos. Además, si bien la claridad de los objetivos es necesaria, no es una condición suficiente para negociaciones exitosas. Si bien existen antecedentes de negociaciones exitosas identificadas por investigaciones anteriores, de los mismos, no son esenciales para el éxito. Además, evidencian antecedentes no observados por la teoría de la negociación: la necesidad de lograr una membresía estable en el grupo de trabajo antes de la formación del grupo; la necesidad de evitar grandes grupos con antecedentes profesionales dispares; y la función positiva de los gerentes que actúan como defensores organizacionales de los enfoques de grupos de trabajo.

Jang; Elfenbein; Bottom (2018)	La investigación descriptiva realizada por académicos de áreas como: antropología, derecho y relaciones internacionales convergen en las características requeridas para una teoría general. Esto incluye un proceso multifásico que comprende planificación, negociación e implementación, así como un proceso multipartidista entre actores organizados dentro de una estructura multinivel.
Gunia (2017)	La mayoría de la gente cree que los negociadores deben evitar hacer la primera oferta. Sin embargo, décadas de investigación han documentado el efecto de la primera oferta en el que la persona que se mueve primero logra un mejor resultado que la persona que se mueve en segundo lugar. Esta brecha entre las creencias laicas y la evidencia de la investigación puede deberse, en parte, al hecho de que los estudios sobre el efecto de la primera oferta se encuentran dispersos en numerosos artículos y revistas científicas. Al revisar muchos de los principales artículos sobre el efecto de la primera oferta, se concluye que los negociadores generalmente deben esforzarse por hacer la primera oferta por razones específicas, en situaciones específicas y de una manera específica.
Ma; Dong; Wu; Liang; Yin (2015)	Este estudio es para ayudar a comprender mejor los estilos de negociación comercial de personas de origen chino al explorar el impacto de la personalidad ideal en el proceso de negociación comercial en la China. Este estudio prueba los efectos de tres componentes claves de la personalidad ideal: la benevolencia (Ren), la sabiduría (Zhi) y el coraje (Yong) sobre sus comportamientos de negociación en ejercicios simulados y sobre sus resultados de negociación.
Rowe (2015)	Muestra en su artículo la interpretación del trabajo del defensor del pueblo en términos de teoría de negociación en la gestión de conflictos.
Fassina y Whyte (2014)	En este artículo se plantea cómo el retroceder en las negociaciones se refiere a manifestaciones verbales o físicas de conmoción, disgusto o incredulidad en respuesta a una oferta inicial. Se investigó el impacto de aconsejar a los negociadores que retrocedan estratégicamente en la negociación distributiva utilizando como método la experimentación.
Ribbink y Grimm (2014)	Este estudio investiga los efectos directos y moderadores de las diferencias culturales en las diádicas negociaciones comprador-proveedor. La teoría se desarrolla con respecto al impacto de la cultura en las ganancias conjuntas, yuxtaponiendo la economía de costos de transacción y la visión relacional. La teoría se prueba con un experimento de negociación. En general, este estudio concluye que las diferencias culturales, como se encuentran en las interacciones comerciales cotidianas en las cadenas de suministro globales, impactan significativamente los resultados de la negociación.
Wilson y Thompson (2014)	En este estudio son presentados los resultados de un trabajo empírico sobre creatividad en la negociación, considerando dos corrientes generales de investigación de la creatividad y sus implicaciones para la teoría de la negociación y el análisis empírico. Los expertos en negociación aconsejan que los negociadores deben participar en la resolución creativa de problemas para elaborar acuerdos integradores, y tanto los teóricos de la negociación como los profesionales creen que la generación de ideas creativas es necesaria para la negociación de ganar-ganar.
Parola y Ellis (2013)	En este documento se presenta la perspectiva del proceso de fusiones y adquisiciones y la teoría de negociación clásica, se desarrolla un marco para resaltar los principales componentes de la etapa de negociación de fusiones y adquisiciones.
Mislin; Campagna; Bottom (2011)	Según los autores, el éxito de un acuerdo negociado depende de la implementación y las implicaciones para el intercambio futuro entre las partes. Este documento examina los factores estructurales, afectivos y contractuales que influyen en el comportamiento al negociar. Las pequeñas conversaciones antes de contratar aumentaron la disposición de los empleados a ser financieramente vulnerables en el intercambio posterior con el empleador. Se consideran las implicaciones para la teoría general de la negociación.

Jochemczyk y Nowak (2010)	Presentan un modelo de Red Dinámica de Negociación (DNN) que vincula el resultado de la negociación con el proceso para lograr ese resultado. Este modelo representa el proceso de negociación en términos de una red construida dinámicamente de nodos de significado interconectados. La estructura de la red y la dinámica de su creación determinan el resultado de una negociación.
Johansson; Elgström; Kimanzu; Nylund; Persson (2010)	Basado en la teoría de la negociación y utilizando tres enfoques explicativos, los autores analizan 18 años de negociaciones entre una ONG, Vi Skogen (ViS) y su GDA, la Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo (Sida), para demostrar cómo las estructuras organizativas, las relaciones de poder y el contexto influyen en el resultado de las negociaciones.
Kolb (2009)	El propósito de este artículo es proporcionar una visión general estructurada sobre la literatura existente que presenta la relación entre el género y la negociación en los últimos 25 años. El artículo resalta cómo la construcción social de género ha cambiado el discurso de los esencialistas sobre las diferencias entre hombres y mujeres, para ver el género como una dimensión más compleja y cambiante de la identidad individual que está conformada por los contextos en los que ocurre la negociación.
Densten (2006)	Examina la validez de la recompensa contingente y su relación con el esfuerzo adicional y avanzar en la comprensión de la relación de recompensa de desempeño líder / seguidor, en términos de la teoría de liderazgo transaccional, la teoría de liderazgo reformulada de camino-meta y la teoría de negociación. Se identificaron tres nuevos factores de recompensa contingente (es decir, enmarcar, aclarar y recompensar). La recompensa contingente (gratificante) apoya el proceso de negociación al apoyarse directamente en la recompensa contingente (aclarar). El proceso de negociación se completa con una recompensa contingente (aclaración) que se apoya directamente en un esfuerzo adicional.
Cakravastia y Nakamura (2002)	Este documento se refiere al desarrollo de un modelo para negociaciones de precio y fecha de vencimiento entre un fabricante y sus múltiples proveedores, para cumplir con un solo pedido de un cliente en un entorno de pedido por pedido. El modelo de negociación desarrollado incorpora varias teorías de negociación establecidas: nivel de aspiración, nivel límite, fuerzas naturales que actúan sobre un negociador y alternativas efectivas. Al brindar un conjunto de alternativas, se ofrece un grado de libertad para incorporar la preferencia del tomador de decisiones al hacer ofertas y contraofertas durante el proceso de negociación.
Kuhn y Gu (1999)	Cuando los pares sindicalistas-empresarios negocian secuencialmente, y cuando los componentes no observados de la capacidad de pago de las empresas están sujetos a perturbaciones correlacionadas, los sindicatos que negocian más adelante en una secuencia pueden adquirir información valiosa al observar los resultados de negociaciones anteriores en su industria. Los autores derivan las implicaciones de este tipo de aprendizaje en un modelo de información asimétrica de negociaciones salariales y argumentan que la implicación más sólida es una menor incidencia de huelgas entre "seguidores" que "líderes" en las negociaciones salariales.

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla anterior, existen evidencias empíricas y desarrollos teóricos en los últimos 20 años, donde los autores han concentrado sus esfuerzos en estudiar al negociador como centro del proceso de negociación, en los estudios son analizados aspectos, como el género, la cultura organizacional, rasgos culturales, efectos de la cultura del país del origen, el liderazgo, el efecto de las recompensas o de las limitaciones, algunas negociaciones específicas o el efecto de un proceso dinámico. Es importante reconocer que en todos los estudios hay una asociación directa entre los posibles resultados de una negociación con el comportamiento del negociador.

En este contexto, se presenta en la Tabla 2, a modo de síntesis, la revisión de investigaciones realizadas donde el objetivo principal es el desarrollo de alternativas para mejorar el proceso de negociación en las empresas y otro tipo de organizaciones.

Tabla 2.
Estudios sobre mejoras al proceso de negociación

Autores	Descripción
Salacuse (2016)	Los estudios de negociaciones a menudo pasan por alto, o al menos no dan cuenta, del importante papel que desempeñan las personas que asesoran a los negociadores. A menudo ocultos deliberadamente a la vista, los asesores tienen una influencia importante, pero no reconocida en la dinámica de negociación. En este artículo son explorados los roles y métodos de los asesores en el proceso de negociación, recurriendo a la teoría de roles.
Coleman y Lim (2001)	La evaluación de capacitación en negociación tiende a ser de corto plazo y fragmentaria. Las evaluaciones a menudo se centran en uno o dos resultados sobresalientes de la capacitación. En este artículo se presenta un modelo para la evaluación de la capacitación en negociación que ofrece una amplia conceptualización de los efectos hipotéticos individuales y grupales de la capacitación en negociación colaborativa.
Watkins (1999)	Basándose en la literatura sobre negociación y resolución de conflictos, así como en investigaciones sobre diplomacia internacional, el autor propone un marco para comprender la complejidad en las negociaciones del mundo real, rechazando modelos del proceso que son simplistas, estériles o estáticos, argumentando la observancia de la complejidad que es inherente a la negociación.
Calhoun-Wells; Liebman (1996)	Los autores consideran el papel cambiante de la mediación, impulsado por las fuerzas sociales de cambio desde finales de los años setenta hasta el presente, y especular sobre el futuro de la agencia y la expansión esperada en el uso de la mediación.

Fuente: elaboración propia.

En la anterior tabla son presentados algunos de los desarrollos alrededor de la importancia de la capacitación para el proceso de negociación, el papel de los asesores, la diplomacia y el rol del mediador, estos mecanismos han sido utilizados en los últimos 25 años en las empresas y son identificados por los autores como acciones estratégicas para mejorar el resultado y la eficiencia de la negociación.

Desde la literatura es posible establecer grandes diferencias culturales entre negociadores de distintos países, es así como Sakabani (2013) plantea que los latinoamericanos buscan conseguir muchos beneficios, pero poco a poco van cediendo, aunque la concesión más importante va al final. Lo anterior difiere de lo observado en Alemania, donde el paso más importante es la planeación previa, en el cual, es determinado el objetivo que se busca, el plazo y los resultados viables. En otros países, la planeación previa no es tan exhaustiva.

Para Fisher; Ury; Patton (2011) hay diferencias en la imagen proyectada por los negociadores americanos, japoneses, franceses y mexicanos. Una de las características primordiales con relación a los japoneses, es la vinculación que existe entre estos y la compañía para la que trabajan, ya que se enfoca en una relación basada en la lealtad mutua y de por vida. Para Tanehashi (2010), más que en otro país cuya cultura muestra fuertes contrastes, los japoneses han empleado técnicas y personas especialistas en trabajar con la manera americana de toma de decisiones, creando un puente sobre los contrastes con el estilo japonés.

En este sentido, se reconoce que existen diferencias en la imagen proyectada por los negociadores, según la cultura, el entorno, las posiciones sociales y la educación que influyen en el método de selección y forma de negociar. Además, como indica Hofstede; Jonker; Verwaart (2012), es posible plantear que los mecanismos de negociación que se determinan en cada cultura, las partes negociadoras son minuciosas cuando se estructuran sus estrategias, teniendo en cuenta las culturas nacionales. Las negociaciones nacen desde las diferencias entre los actores, por esta razón, son los mismos actores los que buscando una solución interactúan para obtener un resultado positivo, en torno a sus propios intereses (Putnam; Jones, 1982). Es así como para Ma *et al.*, (2007) es posible identificar las prácticas en los procesos de negociación que determinan elementos culturales de las empresas y que definen en un alto grado sus estrategias. Por medio de los resultados de la negociación se pueden caracterizar algunos rasgos culturales de los actores (Román; Ruíz, 2003).

En este contexto, las estrategias de negociación son determinadas de acuerdo a la cultura en la cual se desarrollan, sin dejar de ser funcionales. Cada estrategia de negociación debe conjugarse desde la estrategia corporativa y para los indicadores con los que se miden. Con todo lo anterior, en la Figura 1 es diagramado el enfoque teórico del concepto de negociación para abordar el estudio de caso.

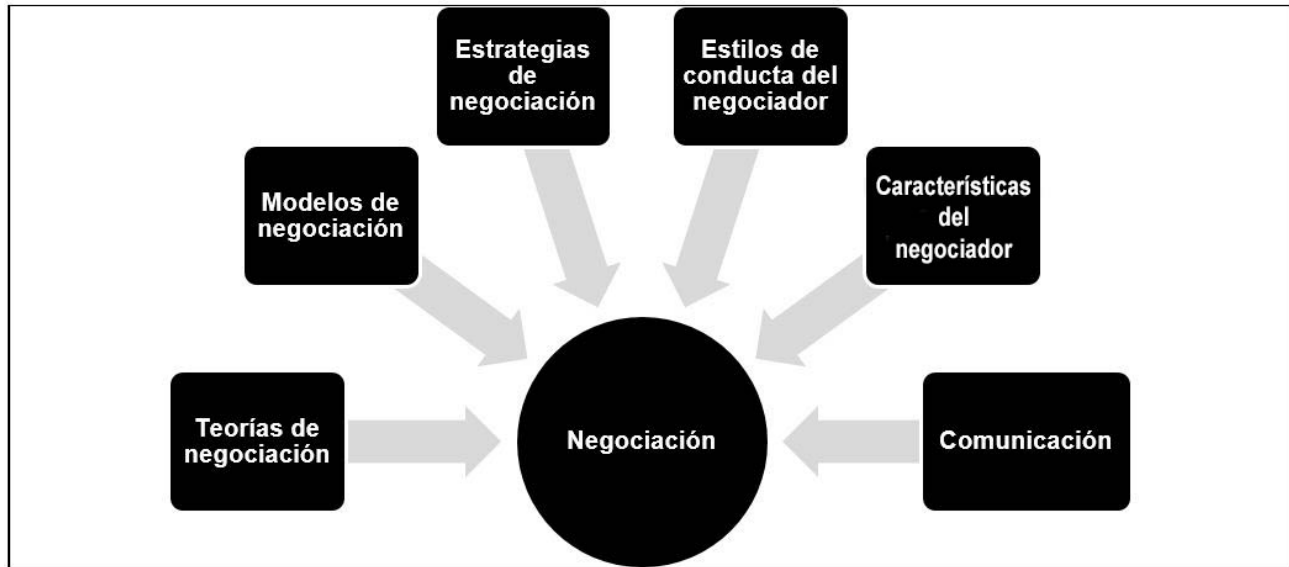


Figura 1. Esquema del enfoque teórico del concepto de negociación
Fuente: elaboración propia.

En este punto, es importante reconocer que existen diferentes desarrollos teóricos orientados desde perspectivas y corrientes que han dado origen a diferentes modelos. Entre estos modelos de negociación algunos de los más utilizados por personas, empresas y gobiernos, son: el modelo Harvard, el modelo competitivo y el modelo 360.

- Modelo de negociación Harvard: es uno de los más utilizados en diferentes procesos de negociación, quizás por la facilidad de adaptación y uso. Según Fisher *et al.*, (2011) los intereses de cada actor determinan el proceso, en este modelo se intenta obtener el mejor resultado para cada actor, lo que es posible lograr por medio de la cooperación entre las partes.

- Modelo de negociación competitivo: según Cohen (1980) es la designación de ganar a como dé lugar la negociación. Es característico de esta negociación que la suma de resultados de las partes sea cero, esto implica que todo lo que logre una de las partes será perdido por su contraparte, utilizando la siguiente premisa: “Un negociador entra en pugna con otros individuos en pos de una meta que solo él espera alcanzar. Aun si lograra persuadir a la parte contraria a jugar esa partida, correría el riesgo de ser el perdedor absoluto en vez del ganador” (Cohen, 1980, p.100). La concepción de un modelo de negociación cooperativo, según Cohen (1980), consiste en que las partes de un proceso de negociación logren un arreglo bueno para todas y no solo para una de ellas. Más aún cuando de una negociación pueden depender otras futuras.

- Modelo de negociación 360 °: según Malaret (2011) el proceso de negociación es una competencia de los seres humanos, este modelo es propuesto con referencia de conceptos provenientes desde la antigüedad, contrastados con algunas técnicas modernas de la gestión de empresas. En la Figura 2 es presentado el esquema del modelo.

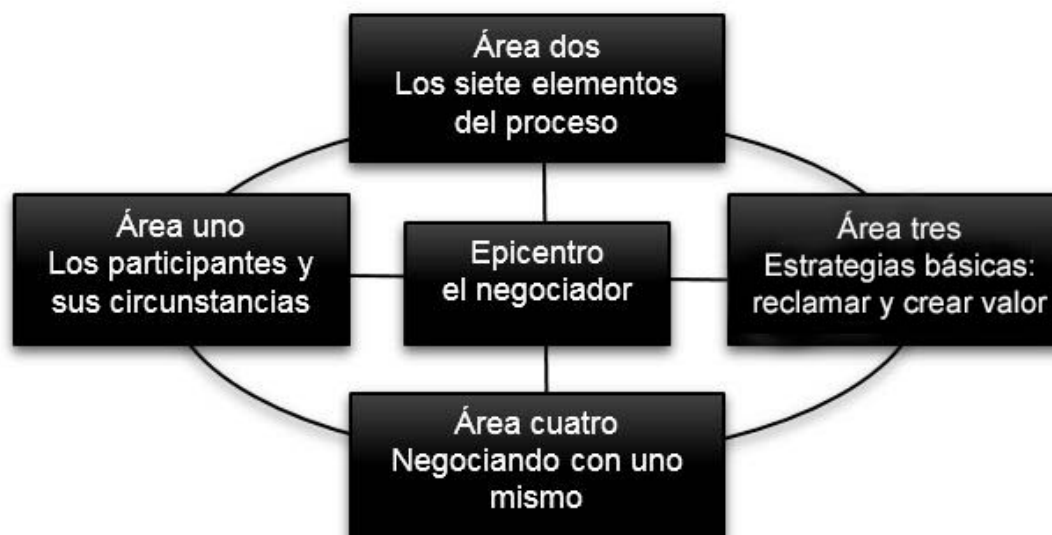


Figura 2. Mapa del concepto negociación 360 °
Fuente: adoptado de Malaret (2011).

Con todo lo anterior, y al evaluar las implicaciones para la empresa que hace parte del estudio de caso y de su contexto, es seleccionado el modelo 360 °, entre otros aspectos, por su fundamento, facilidad de utilización y la integración con los diferentes procesos de toda la empresa. En la Tabla 3 se presentan algunos de los estudios que se han realizado en los últimos años sobre el modelo 360 ° en las empresas y en otros tipos de organizaciones.

Tabla3.
Estudios sobre la implementación de modelos 360 °

Autores	Descripción
Corbi; Lejarreta-Erasti; Burgos (2019)	En este documento es presentada una metodología basada en estándares para extraer datos y calcular los resultados de encuestas de retroalimentación 360. Con especial atención a la idoneidad en el ámbito educativo y pedagógico, donde habían realizado pocos estudios sobre la retroalimentación de 360 ° (también conocido como retroalimentación de múltiples evaluadores) que proporciona una visión holística del desempeño de un evaluado basado en la información y las opiniones reunidas de los evaluadores sobre la persona que está siendo evaluada.
Marshall; Ashleigh; Baden; Ojiako; Guidi (2015)	En este artículo los autores presentan la psicopatía corporativa (PC) como la amenaza más importante para el comportamiento ético corporativo en todo el mundo. Por esa razón, argumentan que los profesionales de la Gestión de Recursos Humanos (HRM) deben formular soluciones estratégicas basadas en metáforas militares que ofrecen inspiración creativa para ayudar a académicos y profesionales a teorizar la PC en formas más ricas, más reflexivas y más equilibradas y complementarias.
Longenecker; Ragland; Mallin (2014)	En este estudio el desarrollo de la gestión de ventas se identifican las prácticas más críticas para el aprendizaje y desarrollo de los gerentes de ventas. Para explorar las necesidades de desarrollo de los líderes de ventas. Los gerentes de ventas en desarrollo desean expectativas de rendimiento claramente definidas, así como la retroalimentación de una amplia variedad de fuentes múltiples, incluidos los procesos de coaching, tutoría y 360 °. Además, las evaluaciones formales y las discusiones de plan de carrera, así como la oportunidad de participar en asociaciones profesionales son áreas deseadas de su desarrollo.

Battley (2012)	Según los autores, dos pilares del desarrollo del liderazgo son la retroalimentación de 360 ° y los procesos de coaching ejecutivo. El coaching está creciendo rápidamente como una actividad de seguimiento para ayudar a los participantes de 360 comentarios a interpretar sus resultados, facilitar el establecimiento de objetivos y lograr un cambio de comportamiento. Se identifican el propósito y los beneficios de la retroalimentación y el entrenamiento 360, así como las principales formas en que se utilizan para avanzar en el talento estratégico de la organización y los objetivos de gestión del desempeño. Se abordan las mejores prácticas, que incluyen cómo maximizar la efectividad de la retroalimentación y las intervenciones de coaching.
Bracken y Rose (2011)	Para los autores, la retroalimentación de 360 ° es muy prometedora como método para crear cambios en el comportamiento y en la organización. Pero para el logro de los resultados se requiere una adaptación. Al alto grado de variación en las características de diseño en 360 procesos, se agregan cuatro características de un proceso 360 que se requieren para crear con éxito el cambio de organización: (1) contenido relevante, (2) datos creíbles, (3) responsabilidad y (4) participación en el censo.
Shipper (2009)	El propósito de este estudio es investigar la sostenibilidad de la mejora en la efectividad gerencial a partir de un proceso sostenido 360. Este estudio investiga los cambios en la efectividad gerencial basados en las calificaciones de los superiores, de los gerentes que pasan por el proceso de retroalimentación 360 hasta cuatro veces durante un período prolongado de tiempo.
Buchko (2007)	El propósito de este documento es examinar el papel de los líderes de la organización, en particular los altos directivos, en la creación de apoyo y el desarrollo de comportamientos que sean consistentes con la gestión basada en valores, proporcionando una evaluación empírica del efecto del liderazgo superior de una organización en el proceso de gestión basado en valores. Los resultados indicaron que los comportamientos de valores del líder estaban significativamente relacionados con los comportamientos de valores de los subordinados. Los subordinados de los líderes que demostraron fuertemente comportamientos de gestión basados en valores, tenían más probabilidades de exhibir los mismos comportamientos.
Shipper; Hoffman; Rotondo (2007)	Los autores plantean que es esencial para la capacidad de una organización y para el crecimiento sostenible, la capacidad de sus gerentes para aprender mejores habilidades que mejoren el rendimiento. Algunas compañías han ido tan lejos como para suponer que el proceso de retroalimentación 360 se aplicará igualmente en todas las culturas. Dado que las diferentes culturas tienen valores diferentes, es necesario examinar el supuesto. Se encontró que el proceso de retroalimentación 360 fue más efectivo en culturas con baja distancia de poder y valores individualistas.
Bracken; Timmreck; Fleenor; Summers (2001)	Los autores plantean las siguientes preguntas: ¿Cómo saber si un proceso 360 se ha implementado con éxito? ¿Cuáles son los factores que influyen en su éxito? ¿Cómo pueden controlar esos factores los responsables de su implementación? A pesar de su popularidad, ha habido poco esfuerzo para construir un modelo integral que aborde estas preguntas fundamentales sobre la retroalimentación 360. En la búsqueda de dicho modelo, identifican una serie de factores claves organizados, según si ejercen su influencia proximal o distalmente. Discuten cómo cada factor contribuye a una implementación exitosa. Después de identificar cómo las características de diseño de un proceso 360 afectan estos factores clave, recomiendan cómo mejorar la probabilidad de implementar la retroalimentación 360 con éxito y mantener el proceso en el tiempo.

Fuente: elaboración propia.

En la anterior tabla se identifican estudios sobre el impacto positivo de incluir mecanismos tipo 360 en diferentes procesos de las empresas, en especial los desarrollos que son generados sobre las personas que ejecutan dichos procesos. Estos estudios soportan la decisión metodológica que utilizan como base del modelo propuesto de negociación para la empresa MFI, un modelo basado en 360 °.

Desde esta orientación, según Malaret (2011) para este modelo, se definen cuatro áreas de negociación: 1) los participantes y sus condiciones, 2) los siete elementos del proceso, 3) las estrategias y 4) la negociación con uno mismo. En estos procesos algunas intenciones motivacionales son evidenciados en la Tabla 4.

Tabla 4.
Tácticas negociadoras de acuerdo con el objetivo que es perseguido

Intenciones Motivacionales	Objetivos Tácticos
Aspectos racionales o instrumentales	Revelar a la otra parte que nuestra propuesta puede ser beneficiosa.
	Enseñar a la contraparte que nuestros objetivos son muy importantes.
	Convencer a la contraparte del logro de beneficios para todos los actores. Además de que se tienen las habilidades, se busca flexibilizar las posiciones.
Aspectos normativos	Apreciar los razonamientos de equidad para elegir entre distintas posibilidades.
	Preparar el trato entre las partes.
Aspectos emocionales	Reducir las diligencias que produzcan emociones negativas entre los actores.
	Encontrar un ambiente que provea un efecto positivo entre los actores.

Fuente: adoptado de Munduate; Medina, (2010)

En cuanto a estrategias y técnicas de Negociación, Malaret (2007) señala los siete elementos definidos en el modelo Harvard que son comunes en todo proceso de negociación, y que pueden ser articulados, los mismos son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5.
Siete elementos de la negociación

Elementos	Definición
Expresarse bien y con facilidad	Es ineludible asumir la destreza de manifestar con validez, disposición de enunciado, es comunicar adecuadamente desde el conocimiento del problema.
Tener la capacidad, análisis y síntesis	Es ser capaces de considerar las locuciones de los otros actores, que favorece su postura, donde se enfrentan con sus intereses y que determinan las posibilidades.
Ser impersonal	El devenir de las acciones en el proceso de negociación no debe conllevar situaciones personales.
Ser pacientes	Es determinante la necesidad de que cada actor presente sus intereses.
Empatía	Es necesario que cada actor tenga la tranquilidad para considerar y evaluar los diferentes puntos de vista de los actores.
Tacto	Mantener una postura de control para tener un buen conocimiento de la naturaleza humana.
Buen humor	Es relevante para construir relaciones futuras.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en este recorrido por la literatura Malaret (2007) identifica diferentes conductas al observar distintos negociadores en acción, los desacuerdos más relevantes a nivel de conducta son expuestos en la Tabla 6.

Tabla 6.
Observaciones conductuales entre un negociador experto y un negociador promedio

Conductas	Observaciones comparativas
Planificación	Negociadores expertos tienen ventaja sobre los nuevos negociadores. Entre otras, por la alineación con la organización, la experiencia sobre el reconocimiento de los límites y el manejo de las herramientas de planeación.
Comportamiento "frente a frente"	Los negociadores expertos evaden la controversia y anticipan su conducta. Tienen el dominio de la situación y pueden plantear de una mejor manera los argumentos, evaden las contrapropuestas, hacen un mayor número de preguntas e intervenciones y expresan más sus sentimientos, lo anterior para controlar el proceso.

Fuente: elaboración propia.

Partiendo del marco teórico propuesto, en la siguiente sección son presentados los elementos que determinan la metodología de la investigación realizada, así mismo, son establecidos los límites derivados tanto por la metodología definida como por el marco teórico elaborado.

2. Metodología

Teniendo en cuenta que el objetivo general de esta investigación fue “diseñar un modelo de negociación basado en los indicadores comerciales para identificar oportunidades que permitan potencializar las estrategias de la compañía de esta investigación”, se propone como método realizar un estudio de caso, dado que entre otros, Kothari (2004) plantea que “el estudio de caso pone más énfasis en el análisis completo de un número limitado de eventos o condiciones y sus interrelaciones” (p.113). En este sentido, para el estudio de caso de la empresa MFI, fueron utilizados métodos cualitativos donde por medio de entrevistas fue recolectada la información en un periodo y, posteriormente, fue realizado el análisis de los datos para presentar los resultados que se articulan en la propuesta incluida en la última sección del artículo. Siendo un caso de estudio tipo descriptivo con una sola unidad de análisis, en términos de Yin (2003) citado por Baxter y Jack (2008, p.548). En la Tabla 7 se muestra una síntesis de los objetivos de la investigación.

Tabla 7.
Metodología

Objetivo general

Diseñar un modelo de negociación basado en los indicadores comerciales para identificar oportunidades que permitan potencializar las estrategias de la compañía.

Objetivos específicos

Examinar el escenario actual de la empresa en el contexto de la negociación.

Analizar la relación existente entre los comportamientos de los líderes que hacen parte del proceso versus los indicadores.

Proponer una estrategia de negociación unificada que esté acorde a la empresa.

Potencializar los indicadores de la compañía.

Fuente: elaboración propia.

Partiendo de adaptaciones realizadas a las definidas en Yin (2003) y Baxter y Jack (2008), en el diseño y la implementación del marco cualitativo en este caso de estudio, y una vez explicados los objetivos y la metodología del caso de estudio, se propone en la Figura 3 el proceso para la recolección de datos, su análisis y la actuación de los investigadores en el marco de una investigación con acción participativa, al menos en el desarrollo del modelo propuesto y la interacción con el equipo del área estudiada.

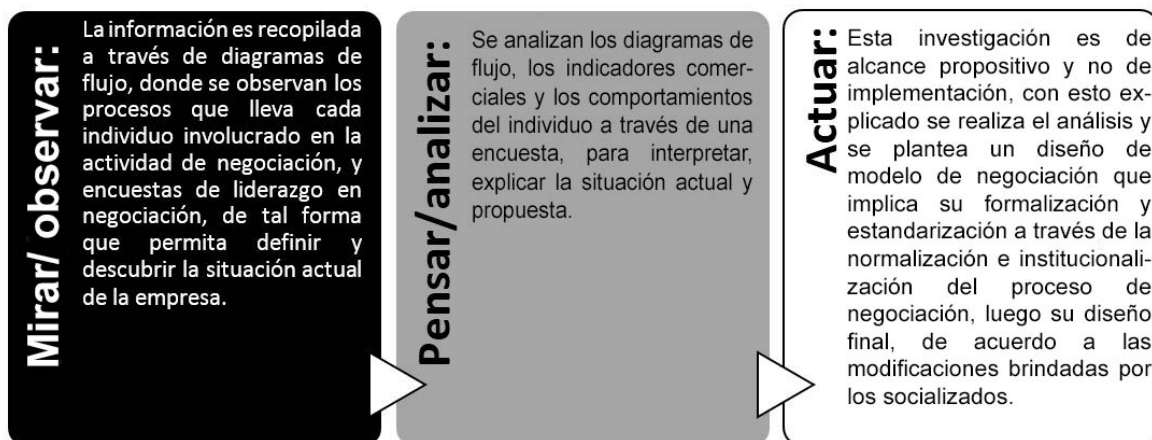


Figura 3. Método de la investigación
Fuente: elaboración propia.

Con relación a la recolección de los datos, desde Kothari (2004) se aborda la discusión entre censo y muestra, partiendo de la diferencia entre “universo y población” (p.55), para esta investigación la población objeto de estudio es finita, dado que fue posible recolectar la percepción del 100 % de las personas que trabajan en el área comercial (no fue necesario obtener el tamaño de la muestra al tratarse metodológicamente en un censo). Las fuentes de información se especifican en la Tabla 8.

Tabla 8.
Fuentes de Información

Primarias	Secundarias	Terciarias
· Gerente general de Ventas de MFI	· Base de datos de la compañía MF	· Internet
· Gerente de RRHH de MFI	· Histórico de ventas	· Referencias bibliográficas
· Ejecutivos comerciales de MFI	· Bibliografía sobre Negociación y Liderazgo	
· Consulta de expertos	· Fuentes estadísticas	
· Normas y procedimientos de MFI		

Fuente: elaboración propia.

El censo realizado fue del número exacto de personas que trabajan en la empresa específicamente en el área comercial, que corresponde a trece personas, las cuales son: un gerente general de ventas, un gerente de campo, diez ejecutivos comerciales y un ejecutivo de trade marketing. Esto hace que no sea necesario obtener el tamaño de la muestra, porque se constituye en un censo.

A nivel de instrumentos, desde Blake y Mouton (1964) fueron utilizadas teorías y herramientas, para identificar los rasgos característicos de los estilos de liderazgo de las personas que se desempeñan como ejecutivos comerciales en MFI en seis zonas específicas de Colombia, con participación representativa de la empresa, durante el período 2010 – 2013. En la Tabla 9 son presentadas algunas características de los ejecutivos que participaron en el estudio.

Tabla 9.
Regionales MFI - EJECUTIVOS

ZONA/BASE	SEXO	EDAD	ID
Cali	Masculino	36 Años	CAL
Barranquilla	Femenino	40 Años	BAR
Bogotá	Masculino	44 Años	BOG
Medellín	Femenino	27 Años	MED
Pereira	Masculino	40 Años	PER
Bucaramanga	Femenino	33 Años	BUC

Fuente: elaboración propia.

La metodología de Blake y Mouton (1964) está compuesta por tres cuestionarios que permiten identificar los estilos de negociación, para así mismo determinar aspectos influyentes de liderazgo al momento de llevar a cabo las negociaciones; estos cuestionarios se basan en las variables Oportunidad de negociación y Liderazgo, las cuales se detallan en la Tabla 10.

Tabla 10.
Variables

Variable	Definición	Indicadores	Dimensiones	Ítems
Oportunidad de negociación	Abrir nuevos mercados para los productos y servicios a través de diferentes estrategias para hacer negocios y generar contactos comerciales.	% de crecimiento del mercado por zonas % clientes % participación de la competencia en el mercado.	Nuevos mercados Estrategias de negociación Competencia Nuevos clientes.	¿Son adecuadas las estrategias de negociación en la búsqueda de oportunidades de negocio? ¿Es adecuada la estrategia para superar la competencia y para persuadir a los consumidores que la propuesta es superior?
Liderazgo	Conjunto de habilidades gerenciales que una sujeto tiene para influir en otras personas o en un grupo de personas determinado, logrando que este equipo trabaje con entusiasmo, en la consecución de metas y objetivos.	% de ventas realizadas en períodos establecidos de estudio % de cumplimiento % de crecimiento en número de clientes.	Habilidades gerenciales Habilidades directivas Facilidades de persuasión Trabajo en equipo Trabajo con entusiasmo Orientado a metas y objetivos Iniciativa.	¿Desarrolla habilidades gerenciales y tiene facilidad de persuadir en una solución de conflicto? ¿Le gusta trabajar en equipo y cuenta con habilidades para orientar a un equipo o grupo de personas? ¿Le es fácil tener iniciativa en las decisiones?

Fuente: elaboración propia.

Así mismo, se incluyen algunas tácticas y valores agregados que según lo evidenciado, corresponden a los factores más predominantes del modelo identificado desde el componente teórico de la investigación (ver Tabla 11).

Tabla 11.
Tácticas y valor agregado

Áreas	Factores	Táctica	Valor agregado
Participantes	Convicción	Diseño en conjunto de procesos y políticas del negocio.	Dar mayor entendimiento y dinámica a los procesos para hacerlos más eficientes.
	Sentido del humor	Reuniones concretas, reconocimiento público de logros, capacitación de manejo de estrés, acercamiento entre jefes y colaboradores.	Proyección de profesionalismo y orientación al logro, mejora trabajo en equipo, reducción de incapacidades.
	Temperamento	Diseño en conjunto de procesos y políticas del negocio.	Aprovechamiento de las diferentes características de cada individuo.
Procesos	Asignación a los ejecutivos como responsables de las cuentas.	Asignar cuentas por ejecutivo, de acuerdo a la ubicación regional. Reestructuración de zonas.	Mayor seguimiento, presencia y control, se incentiva la competencia y mejora continua con dinamismo comercial.
Estrategias	Centralización de negocios en ciudades principales.	Distribuir los principales clientes por ciudad (Bogotá, Cali, Medellín, Pereira, Barranquilla y Bucaramanga).	Foco de atención y respuesta inmediata a los principales clientes, estrategias desarrolladas, de acuerdo a la región y especialización del colaborador por cliente.
	Concentración de negocios tipo droguerías sin desarrollar en el centro del país.	Ampliar cobertura y mejorar frecuencia de visita en el centro del país (Cundinamarca), reestructuración de zonas.	Incremento en la colocación de producto y por defecto incremento en las ventas de la región, mejora de atención al cliente.

Fuente: elaboración propia.

En el marco de esta investigación, el desarrollo de estos instrumentos permitió concluir que la estrategia comercial, conduce a plantear la aplicación de las tácticas para reducir la incertidumbre en la viabilidad comercial del negocio, y así identificar cuáles son las áreas que favorecen o no el modelo propuesto. En este caso, y como ejemplo desde lo metodológico, se logró identificar en los participantes factores culturales importantes que indican hacia dónde dirigirnos.

Es importante reconocer los límites de esta metodología que, tal como lo plantea Kothari (2004), están determinados desde el diseño propuesto y por los criterios de la selección del caso. Estos límites metodológicos determinan el alcance y la validez de los resultados obtenidos, pero también establecen los puntos de partida para futuras investigaciones. Además de los límites propios de la metodología elegida y los del contexto del caso de estudio, existen límites asociados al marco teórico y al estado del arte desarrollados para esta investigación (Baxter y Jack, 2008).

Partiendo de la metodología propuesta en la siguiente sección del artículo, son definidos los componentes del modelo basado en el sistema de negociación 360 °, donde son propuestas cuatro áreas fundamentales alineadas a la estrategia de la empresa.

5. Resultados

Siguiendo la metodología propuesta del estudio de caso en términos de Yin (2003) y Baxter y Jack (2008), con los límites evidenciados en la sección anterior, entre otros, desde el marco teórico, la definición del diseño del caso de estudio y de los instrumentos, en esta sección se realiza una evaluación del modelo, con el objetivo de construir razonamientos de mejora a partir de buscar la coherencia entre los criterios propuestos teóricamente y los hallazgos de la práctica real, este proceso de evaluación cuenta con las finalidades identificadas en la Figura 4.

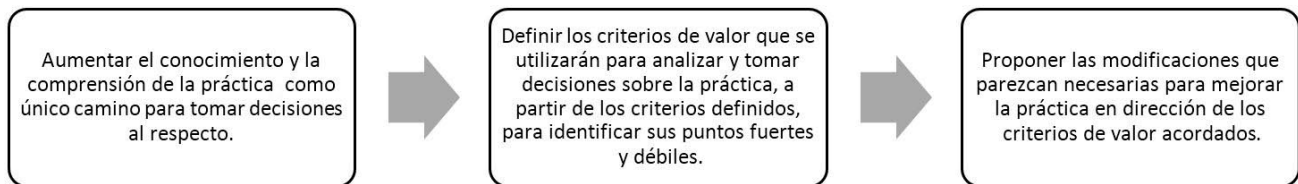


Figura 4. Finalidades del proceso de evaluación
Fuente: elaboración propia.

A continuación, se definen los componentes utilizados en la creación del modelo adaptado a las necesidades de la empresa MFI. Desde el marco teórico, el estado del arte y el contexto del caso de estudio, con el objetivo de proponer las dimensiones de la negociación (dado que en la empresa MFI no existe un modelo específico para los ejecutivos comerciales), se requiere un modelo que permita hacer negocios estables y efectivos, por medio del análisis de los resultados obtenidos, las habilidades, destrezas y herramientas que han adquirido las personas a través del tiempo; se plantea el modelo de negociación 360 ° de Malaret (2007), desde cuatro áreas principales en el momento de realizar una negociación, propuestas en la Figura 5.

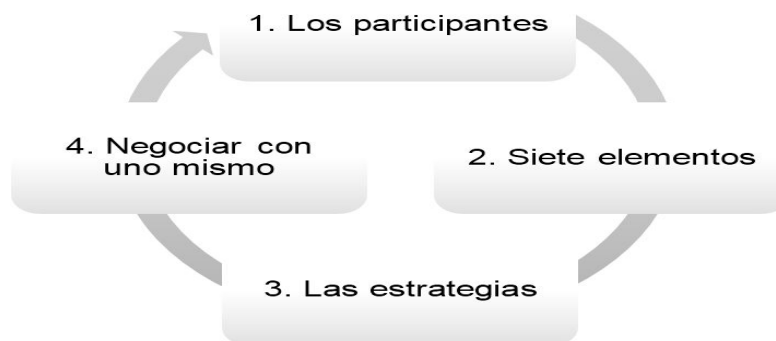


Figura 5. Diagrama áreas principales de la negociación
Fuente: adaptado de Malaret (2007).

Con relación a las cuatro áreas de la negociación:

Área 1: Los participantes y sus circunstancias. Busca analizar la mayor información posible de todas las partes involucradas en la negociación directa e indirecta, de la misma forma que todos los intereses presentes. Entre mayor información sea posible consolidar se tendrá innegable ventaja ante los negociadores.

Área 2: Los siete elementos del proceso. Para los ejecutivos de la empresa no existe un protocolo definido que oriente y obtenga resultados satisfactorios en las negociaciones y que se reflejen en las ventas, cada ejecutivo utiliza la estrategia que le da resultado. En la Figura 6 se exponen los siete elementos del proceso, los cuales sirven para preparar la negociación, conducirla, revisarla y evaluarla una vez cerrada.

Gente	Comunicación y relación (catalogar favorabilidad vs importancia en la negociación).
Problema	Intereses (inversión, contrapartidas) Beneficio mutuo (concesiones-contrapartidas) Legitimidad (de acuerdo a políticas).
La propuesta	La mejor alternativa (escalas de negociación) Compromiso (volumen de compra, días de pago y fechas de implementación).

Figura 6. Elementos del proceso
Fuente: elaboración propia.

En resumen, tener claro los elementos del proceso es clave para lograr un orden ideal para optimizar las futuras negociaciones, esto determina una hoja de ruta para alcanzar de los objetivos propuestos y da la pauta para implementar las estrategias comerciales.

Área 3: Las estrategias. Lo anterior produce el valor agregado luego debe ser solicitado, pero con mayor cantidad. Estas dos estrategias siempre deben aplicarse una con la otra, lo importante es saber cuándo es el momento adecuado para reclamar o negociar.

Área 4: Negociación con uno mismo. En el caso de estudio, para la empresa MFI, el área de negociación es exclusiva de cada individuo, y, por lo tanto, no se está generalizando, dado que cada actuación es única. Al ser un concepto tan amplio el “de negociar con uno mismo”, el cual se puede estudiar desde diferentes perspectivas, para esta investigación se realizó un enfoque desde los estilos de liderazgo Blake y Mouton (1964), anteriormente planteadas en el marco teórico sobre liderazgo.

En este contexto, sin ser un componente adicional, es necesario definir que el “epicentro” es el negociador, es la figura más importante en el proceso de negociación, por sus habilidades, destrezas o conocimientos adquiridos a través del tiempo son posibles las negociaciones o el fin deseado, todo buen negociador sabe que cada negocio es distinto y particular, desde la experiencia se aprende, y más aún de aquellas donde no se ha logrado el mejor resultado, bajo la premisa de que no solo se aprende a partir del éxito.

Teniendo en cuenta los anteriores argumentos, a continuación son presentadas las consideraciones ideales que son la base en los planteamientos del negocio. La Figura 7 representa la adopción de una estrategia metodológica para la resolución del nuevo modelo. Dicho de otra manera, es la estructura y plan para lograr conseguir mejores resultados, además, establece el marco conceptual para el análisis de las distintas variables. El enfoque culturista motivacional es el elemento fundamental de la propuesta, donde son identificadas las relaciones interpersonales como elementos destacados en el proceso de la negociación.

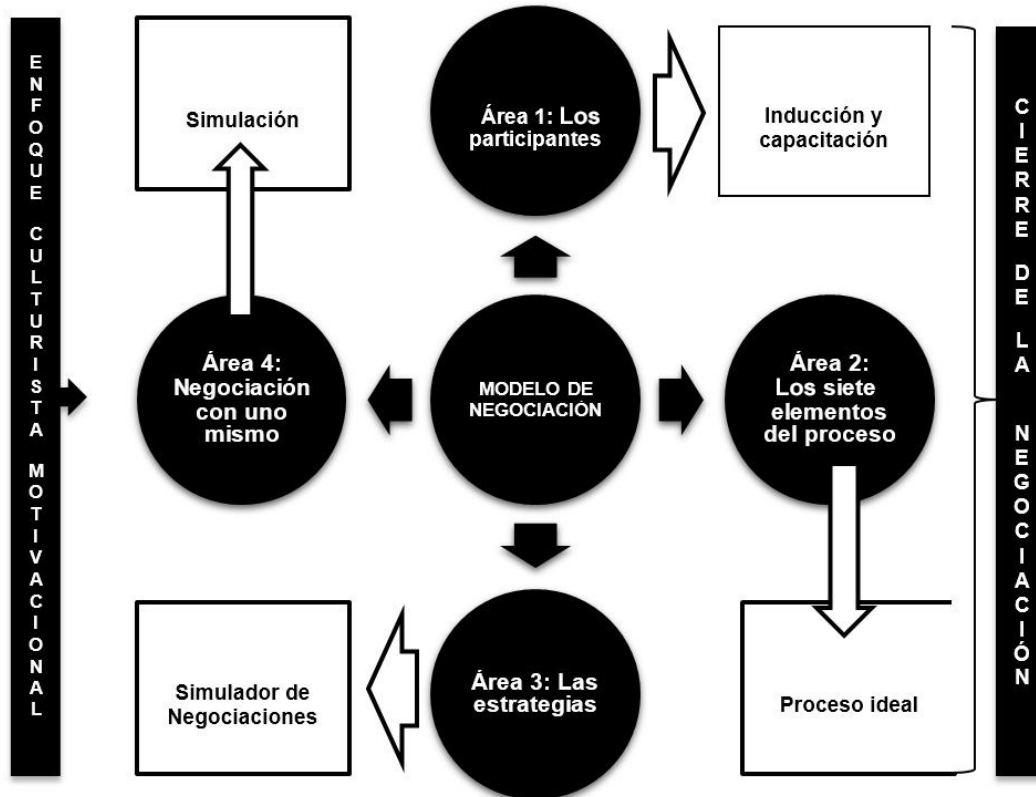


Figura 7. Modelo propuesto
Fuente: elaboración propia.

En este modelo por áreas, se pretende llegar a una generalización coherente con la validez, la objetividad y la confiabilidad de las mediciones. El Área 1: promueve la determinación de las reglas del juego, tales como: el entorno económico, los objetivos, los participantes, los intereses y todo aquello que afecte de alguna manera el proceso. En el Área 2: se describe el proceso que sirve para preparar la negociación, conducirla, revisarla. Es posible plantear un ejercicio de simulación para evidenciar falencias y reforzar donde sea necesario la simulación al interior de la compañía, puede darse a nivel logístico, financiero y de personal para determinar la capacidad de respuesta a dicha negociación. Desde lo anterior, la capacitación persigue como metas el perfeccionamiento que se establece en la Figura 8.

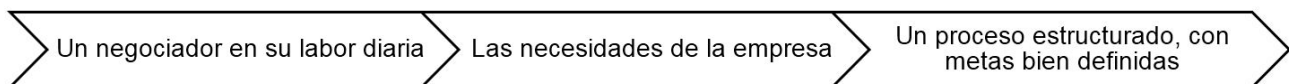


Figura 8. Metas de la capacitación
Fuente: elaboración propia.

La necesidad de capacitación es determinada desde el desarrollo de valoraciones de desempeño o desde descripciones de los perfiles para los cargos o puestos de trabajo relacionados con el proceso. En esta etapa, la capacitación y desde las necesidades de formación, se plantearon cuatro fases que son identificadas en la Figura 9.

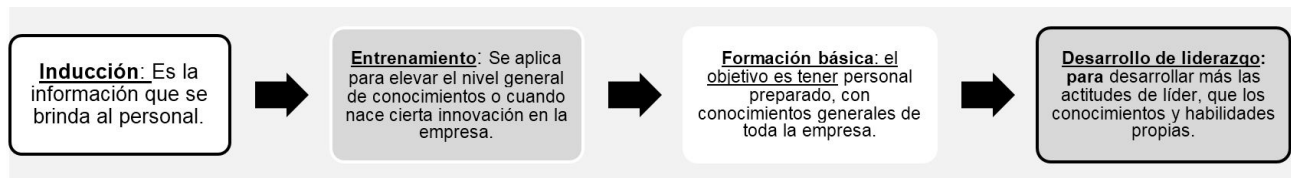


Figura 9. Aplicación de la capacitación
Fuente: elaboración propia.

Retomando el análisis de los hallazgos teóricos, en la descripción de un modelo ideal se plantea que la preparación puede ser el 50 % del éxito en la negociación, debido a que permite estudiar importantes variables que influyen directamente en el proceso de negociación. Partiendo de lo anterior, y con la contratación del análisis realizado en el caso de estudio, en la Figura 10 se despliega la estrategia ideal para un proceso de negociación y tomar decisiones con los ajustes planteados, que incluyen aspectos a tener en cuenta para realizar una excelente preparación de la negociación.

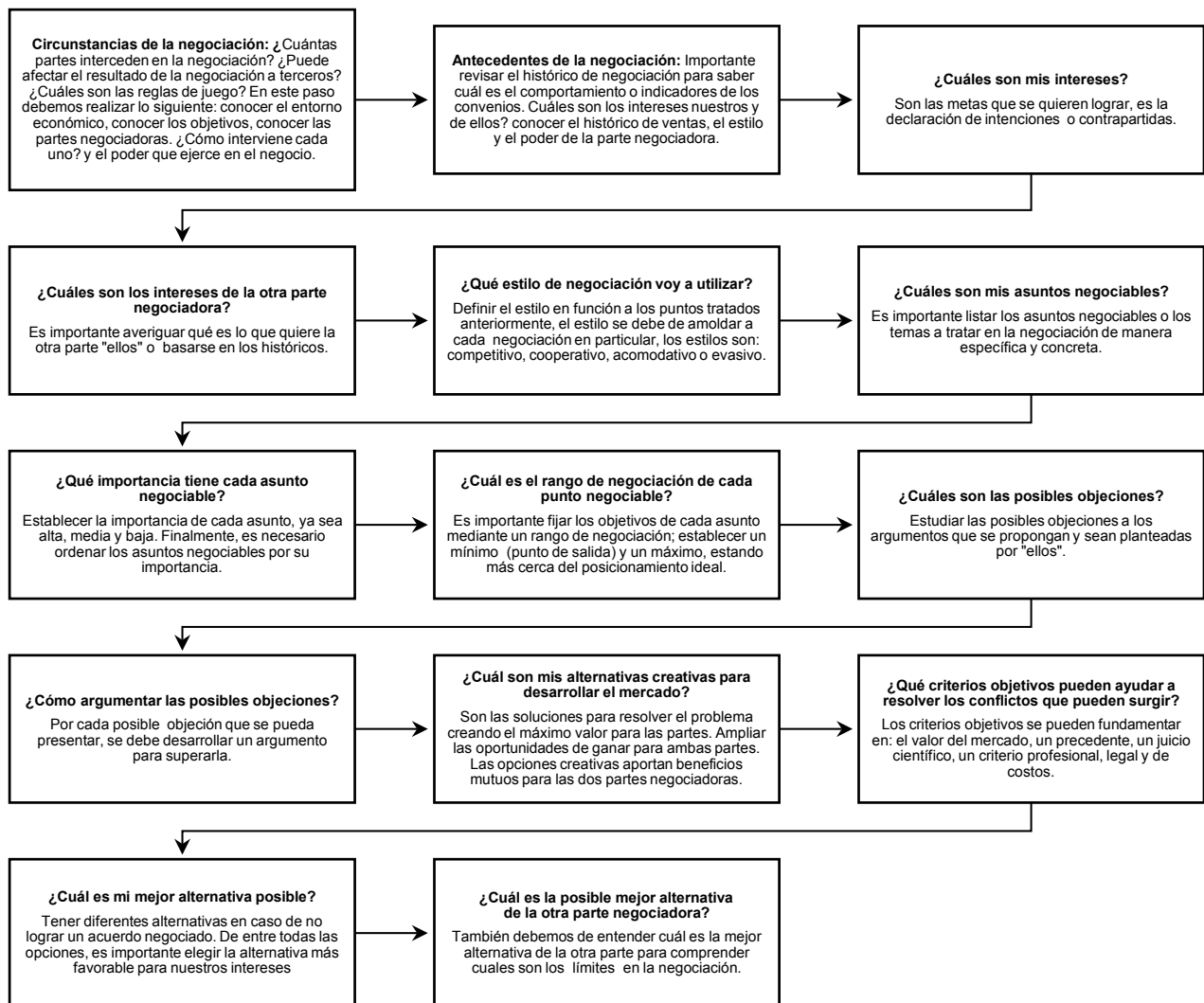


Figura 10. Proceso ideal
Fuente: elaboración propia.

En la investigación se evidenció que en el caso de estudio los preparativos de la negociación eran realizados de forma intuitiva, después de la revisión teórica, el análisis de los datos y la reflexión es importante ajustar este proceso por medio de métodos como el propuesto, donde son identificados los intereses, priorizados, imaginados o investigados. Hay que tener criterios objetivos que consigan ayudar a encontrar razonamientos comunes e idear posibles soluciones para las diferentes objeciones que serán tratadas. Así mismo, es fundamental valorar la situación actual relacional con la contraparte, y el beneficio o no de conservarla y optimizarla, visualizar los problemas de comunicación o crear planes o ideas para mejorar la comunicación con la otra parte y, finalmente, repasar la forma de los posibles acuerdos. Lo anterior está muy relacionado con lo planteado por Cellich (1998), con relación a la importancia de los dotes de la comunicación en la negociación. En conclusión, pensar en la alternativa del convenio negociado de las partes y perfeccionar la propia si fuera posible.

Desde el anterior modelo descrito, y teniendo en cuenta el esquema del proceso ideal, en la siguiente sección se plantean, a modo de reflexión, elementos para la discusión, que sin ser conclusivos pueden representar en resumen algunos de los hallazgos importantes de la investigación.

6. Discusión y Conclusiones

En esta investigación se abordó el estudio de caso del proceso de negociación comercial en una empresa Multinacional de Formulas Infantiles (MFI), desde un marco teórico y el estado del arte desarrollados ambos para determinar el enfoque teórico de la investigación, que sirvió para preparar los instrumentos y definir el alcance del estudio realizado. Son evidentes en este artículo los aportes teóricos, metodológicos y el modelo resultante que por la validez del estudio podrá ser replicado en otras empresas del mismo sector o de otros sectores. Los límites que ya fueron declarados, están dados por la perspectiva teórica, la metodología y propiamente por el caso de estudio elegido.

Es importante reconocer que en la actualidad, para las empresas, el proceso de negociación cada día se convierte en uno de los más relevantes por el impacto sobre el desempeño de las mismas. En muchas empresas, tal como ocurre con la MFI, no existe un proceso o un modelo de negociación acordado que haga parte de la cultura de la organización, sino que depende de cada individuo, con todos los límites y problemas que esto genera. De lo anterior, se reconoce que la negociación como proceso hay que gestionarla, y que es una responsabilidad del líder de la empresa o del área encargada, definir un mecanismo para lograr este propósito.

Las empresas, al igual que las personas, comienzan a darse cuenta que sus acciones tienen más repercusión en lo que pasa en su entorno, por tal motivo, cada vez se incrementa la necesidad de que las empresas gestionen los negocios con una conducta ética, de aquí la necesidad de generar más liderazgo con efectividad e inspirador, que logre cambiar el “yo” por el “nosotros” al momento de tomar decisiones.

En este contexto, al evaluar el diseño del proceso de negociación por medio de diferentes mecanismos con el equipo comercial de la empresa del caso de estudio, y después de analizar diferentes enfoques teóricos sobre la negociación, se concluye que al crear una visión clara orientadora sobre cómo llevar a cabo el proceso, revisar los antecedentes, se puede interpretar mejor la negociación. Una vez establecidos los componentes, es más fácil elegir las herramientas necesarias para determinar el resultado esperado, enfocándose en el problema y evitando desviaciones de la aspiración inicial.

Así mismo, es de vital importancia reconocer que la perspectiva teórica utilizada para el diseño del modelo, permite la ampliación y el análisis de otros procesos de la empresa y puede implementarse en las demás áreas o departamentos. También este modelo puede ser utilizado en otras empresas que pertenezcan al mismo sector comercial, donde las estrategias de negociación funcionen, de acuerdo a la cultura organizacional, sin dejar de ser funcional.

Este artículo propone una estructura de análisis y de acción que potencializa los resultados en las relaciones a todo nivel, dado que permite entender el “cómo” lograr el mayor beneficio a partir de los mínimos detalles y brinda un método para deducir y predecir algunas situaciones, las cuales generan una ventaja para alcanzar los objetivos propuestos.

Si bien se logró demostrar que es importante los diálogos honestos y las relaciones de largo plazo para las negociaciones, esto conlleva a que quienes utilicen el modelo, reflexionen y profundicen en un proceso de negociación factible y de alcance

para todos, dado que tal como fue evidenciado a lo largo de este artículo, los marcos mentales y la cultura establecen ciertos resultados en el negocio y determinan su desempeño. Es precisa la adopción de nuevas estrategias que permitan interiorizar, de manera más eficaz, los nuevos elementos del modelo. En este sentido, se plantean las ventajas de utilizar simuladores de negociación, no como una novedad, sino como parte del día a día en la gestión de las negociaciones, dado que está probado que impactan positivamente en el proceso y en los resultados.

Los simuladores que se basan en sistemas de información robustos, deben ser diseñados para ejercitar la forma de lograr los objetivos con argumentos concretos de manera exitosa utilizando destrezas comunicativas, trabajando la escucha y por medio de diferentes técnicas de preguntas. Además, se deben incorporar elementos que permitan entender la comunicación no verbal. También, es relevante en este proceso comprender la importancia de la capacitación centrada en un modelo integral con enfoque cultural/motivacional, siguiendo algunos de los pasos recomendados para la preparación de la negociación, y de esta forma obtener el resultado esperado y seguimiento óptimo.

7. Referencias

- Battley, Susan (2012). *360-Degree Feedback and Executive Coaching*. The Oxford Handbook of Lifelong Learning. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195390483.013.0079>
- Baxter, Pamela; Jack, Susan (2008). Qualitative case study methodology: Study design and implementation for novice researchers. *The qualitative report*, 13(4), 544-559.
- Blake R.; Mouton J. (1964). *The Managerial Grid, the Key to Leadership Excellence*. Houston, TX: Gulf Publishing Company.
- Bracken, David; Timmreck, Carol; Fleenor, John; Summers, Lynn (2001). 360 Feedback from another angle. *Human Resource Management*, 40(1), 3-20. <https://doi.org/10.1002/hrm.4012>
- Bracken, David; Rose, Dale (2011). When Does 360-Degree Feedback Create Behavior Change? And How Would We Know It When It Does? *Journal of Business and Psychology*, 26, 183-192. <https://doi.org/10.1007/s10869-011-9218-5>
- Buchko, Aaron (2007) The effect of leadership on values-based management. *Leadership and Organization Development Journal*, 28(1), 36-50. <https://doi.org/10.1108/01437730710718236>
- Cakravastia, Andi; Nakamura, Nobuto (2002). Model for negotiating the price and due date for a single order with multiple suppliers in a make-to-order environment. *International Journal of Production Research*, 40(14), 3425-3440. <https://doi.org/10.1080/00207540210147007>
- Calhoun-Wells, John; Liebman, Wilma (1996). New models of negotiation, dispute resolution, and joint problem solving. *Negotiation Journal*, 12(2), 119. <https://doi.org/10.1111/j.1571-9979.1996.tb00085.x>
- Cellich, Claude (1998). Importancia de las dotes de comunicación en la negociación. *Informador Técnico*, 58, 46-52. <https://doi.org/10.23850/22565035.1093>
- Cohen, Herb (1980). *Todo es negociable*. Barcelona, España: Planeta, Ed.

- Coleman, Peter; Lim, Ying (2001). A systematic approach to evaluating the effects of collaborative negotiation training on individuals and groups. *Negotiation Journal*, 17, 363-387.
<https://doi.org/10.1111/j.1571-9979.2001.tb00246.x>
- Corbi, Alberto; Lejarreta-Errasti, Iratxe; Burgos, Daniel (2019). A Scalable Approach for 360° Feedback in Cooperative Learning. *IEEE Access*, 7, 9105-9115.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2887272>
- Densten, Iain (2006). Negotiating extra effort through contingent rewards. *Leadership and Organization Development Journal*, 27(1), 38-49.
<https://doi.org/10.1108/01437730610641359>
- Fassina, Neil; Whyte, Glen (2014). "I am Disgusted by Your Proposal": The Effects of a Strategic Flinch in Negotiations. *Group Decision and Negotiation*, 23(4), 901-920.
<https://doi.org/10.1007/s10726-013-9360-8>
- Fisher, Roger; Ury, William; Patton, Bruce (2011). *Obtenga el si. El arte de negociar sin ceder*. Bogotá, Colombia: Editorial Norma S.A.
- Gunia, Brian (2017). To move or to wait? Everything you need to know about making the first offer. *Business Horizons*, 60(1), 15-18.
<https://doi.org/10.1016/j.bushor.2016.09.006>
- Hofstede, Gert; Jonker, Catholijn; Verwaart, Tim (2012). Cultural differentiation of negotiating agents. *Group Decision and Negotiation*, 21(1), 79-98.
<https://doi.org/10.1007/s10726-010-9190-x>
- Jang, Daisung; Elfenbein, Hillary; Bottom, William (2018). More than a phase: Form and features of a general theory of negotiation. *Academy of Management Annals*, 12(1), 318-356.
<https://doi.org/10.5465/annals.2016.0053>
- Jeive, Michael; Saner, Raymond (2019). Negotiating international strategic alliances: Success and failures - Some closing thoughts. *European Journal of International Management*, 13(5), 700-708.
<https://doi.org/10.1504/EJIM.2019.102007>
- Jochemczyk, Lukasz; Nowak, Andrzej (2010). Constructing a Network of Shared Agreement: A Model of Communication Processes in Negotiations. *Group Decision and Negotiation*, 19(6), 591-620.
<https://doi.org/10.1007/s10726-009-9165-y>
- Johansson, Karl; Elgström, Ole; Kimanzu, Ngolia; Nylund, Jan; Persson, Reidar (2010). Trends in Development Aid, Negotiation Processes and NGO Policy Change. *Voluntas: International Journal of Voluntary and Nonprofit Organizations*, 21(3), 371-392.
<https://doi.org/10.1007/s11266-010-9131-y>
- Kolb, Deborah (2009). Too bad for the women or does it have to be? Gender and negotiation research over the past twenty-five years. *Negotiation Journal*, 25(4), 515-531.
<https://doi.org/10.1111/j.1571-9979.2009.00242.x>
- Kothari, C. R. (2004). *Research methodology: Methods and techniques*. New Age International Pvt Ltd Publishers.
- Kuhn, Peter; Gu, Wulong (1999). Learning in sequential wage negotiations: Theory and evidence. *Journal of Labor Economics*, 17(1), 109-140.
<https://doi.org/10.1086/209915>

- Longenecker, Clinton; Ragland, Charles; Mallin, Michael (2014) Developing high performance sales managers: Key practices for accelerating growth. *Development and Learning in Organizations*, 28 (2), pp. 10-13.
<https://doi.org/10.1108/DLO-07-2013-0037>
- Ma, Z. (2007). Conflict management styles as indicators of behavioral pattern in business. *International Journal of Conflict*, 18(3) 260-279.
<https://doi.org/10.1108/10444060710825990>
- Ma, Zhenzhong; Dong, Weiwei; Wu, Jie; Liang, Dapeng; Yin, Xiaopeng (2015). Confucian Ideal Personality and Chinese Business Negotiation Styles: An Indigenous Perspective. *Group Decision and Negotiation*, 24(3), 383-400.
<https://doi.org/10.1007/s10726-014-9394-6>
- Malaret, Juan (2007). *Negociación en Acción*. Madrid, España: Diaz de Santos.
- Malaret, Juan (2011). *Negociación en acción. El Proceso* 360. Madrid, España: Diaz de Santos.
- Marshall, Alasdair; Ashleigh, Melanie; Baden, Denise; Ojiako, Udechukwu; Guidi, Marco (2015) Corporate Psychopathy: Can 'Search and Destroy' and 'Hearts and Minds' Military Metaphors Inspire HRM Solutions? *Journal of Business Ethics*, 128, 495-504.
<https://doi.org/10.1007/s10551-014-2117-8>
- Mislin, Alexandra; Campagna, Rachel; Bottom, William (2011). After the deal: Talk, trust building and the implementation of negotiated agreements. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 115(1), 55-68.
<https://doi.org/10.1016/j.obhdp.2011.01.002>
- Munduate, L.; Medina, F. J. (2011). *Gestión del Conflicto, Negociación y Mediación*. (4 edición), Madrid, España: Pirámide.
- Parola, Heather; Ellis, Kimberly (2013). M&A negotiation stage: A review and future research directions. *Advances in Mergers and Acquisitions*, 12, 33-57.
[https://doi.org/10.1108/S1479-361X\(2013\)0000012005](https://doi.org/10.1108/S1479-361X(2013)0000012005)
- Pérez-Hernández, Fernando (2003). Tópica de la negociación. *Cuadernos de Información y Comunicación*, 8, 17-38.
- Putnam, Linda; Jones, Tricia (1982). The role of communication in bargaining. *Human Communications Research*, 8(3), 262-280.
<https://doi.org/10.1111/j.1468-2958.1982.tb00668.x>
- Ribbink, Dina; Grimm, Curtis (2014). The impact of cultural differences on buyer-supplier negotiations: An experimental study. *Journal of Operations Management*, 32(3), pp. 114-126.
<https://doi.org/10.1016/j.jom.2014.01.004>
- Román, Sergio; Ruíz, Salvador (2003). A comparative analysis of sales training in Europe: Implications for. *International Marketing Review*, 20(3), 304-327.
<https://doi.org/10.1108/02651330310477611>
- Rowe, Mary (2015). Negotiations Theory and Ombuds Practice. *Negotiation Journal*, 31(4), 419-423.
<https://doi.org/10.1111/nejo.12119>
- Sakabani, Bassam (2013). *Las negociaciones en el mundo*. San Vicente, España: ECU.

- Salacuse, Jeswald (2016). The Effect of Advice on Negotiations: How Advisors Influence What Negotiators Do. *Negotiation Journal*, 32(2), 103-125.
<https://doi.org/10.1111/nejo.12150>
- Sandvik, Alexander; Croucher, Richard; Gooderham, Paul (2019). Negotiation and the alignment of knowledge workers with organisational goals. *European Journal of International Management*, 13(1), 69-87.
<https://doi.org/10.1504/EJIM.2019.096503>
- Shipper, Frank (2009). Investigating the sustainability of a sustained 360 process. *Academy of Management*, 2009(1).
<https://doi.org/10.5465/ambpp.2009.44265101>
- Shipper, Frank; Hoffman, Richard; Rotondo, Denise (2007). Does the 360 feedback process create actionable knowledge equally across cultures? *Academy of Management Learning and Education*, 6(1), 33-50.
<https://doi.org/10.5465/amle.2007.24401701>
- Sofer, I., Sarne, D. & Hassidim, A. (2016) Negotiation in exploration-based environment, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 30(4), pp. 724-764.
<https://doi.org/10.1007/s10458-015-9303-7>
- Tanehashi, Amadeo (2010). Factores culturales y negocios en Japón. *Información Comercial Española, ICE: Revista de Economía*, 586, 79-88.
- Watkins, Michael (1999). Negotiating in a complex world. *Negotiation Journal*, 15, 229-244.
<https://doi.org/10.1111/j.1571-9979.1999.tb00195.x>
- Wilson, Elizabeth; Thompson, Leigh (2014). Creativity and negotiation research: The integrative potential. *International Journal of Conflict Management*, 25(4), 359-386.
<https://doi.org/10.1108/IJCMA-05-2014-0033>
- Yin, Robert (2003). *Case Study Research: Design and Methods*. Thousand Oaks, California: Sage.

Control estadístico del consumo de agua en la Universidad del Atlántico: diseño sistema de monitoreo sistema de gestión ambiental

Water consumption statistical control in the Universidad del Atlántico: environmental management monitoring system designs

Miguel Ibarra-Montes¹
Roberto Herrera-Acosta²
Viviana Ortega-Afanador³

¹ Universidad del Atlántico (Colombia). Correo electrónico: maibarra@mail.uniatlantico.edu.co

² Universidad del Atlántico (Colombia). Correo electrónico: robertoherreerar@mail.uniatlantico.edu.co; orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4855-4830>

³ Universidad del Atlántico (Colombia). Correo electrónico: vivortega@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido: 23-08-2019 Aceptado: 23-12-2019

Cómo citar: Ibarra-Montes, Miguel; Herrera-Acosta, Roberto; Ortega-Afanador, Viviana. (2020). Control estadístico del consumo de agua en la Universidad del Atlántico: diseño sistema de monitoreo sistema de gestión ambiental. *Informador Técnico*, 84(1), pp 100-113. <https://doi.org/10.23850/22565035.1756>

Resumen

En los últimos tiempos se ha evidenciado una preocupante disminución en las fuentes de recurso hídrico para el consumo humano, distintos factores son los causantes de su deterioro y elevado consumo en las actividades industriales, agrícolas y de consumo diario en poblaciones grandes, para esta última, la Universidad del Atlántico gestiona este recurso mediante el Sistema de Gestión Ambiental (SGA). El objetivo de este trabajo fue estudiar el control estadístico en el consumo del agua por bloques en la Institución; se realizaron diseños de cartas de control por cada bloque durante un semestre, como datos históricos, los cuales se usaron luego para comparar, mediante las medidas paramétricas usadas en las cartas de mediciones individuales los controles presentes en el consumo de agua. Usando el control estadístico se logró evidenciar alteraciones en el consumo de agua con lo que se realizaron inspecciones de posibles fugas, lo cual justificó las causas de variabilidad a intervenciones de obras en algunos bloques y se dieron recomendaciones de mecanismos a implementar para el control del consumo del preciado líquido.

Palabras clave: monitoreo ambiental; indicador ecológico; gráficos de control.

Abstract

Recently, there has been a worrying decrease in the water resources sources for human consumption, many factors are the cause of their deterioration and high industrial, agricultural and daily consumption activities in large populations, for the latter, the Universidad del Atlántico manages this resource through the Environmental Management System; this study presents the statistical control in the water consumption by buildings in the institution; Control chart designs were made for each building during a term as historical data, which were then used to compare, through the parametric measurements used in the individual measurements charts, the present controls in the water consumption. By using statistical control,

it was possible to show alterations in water consumption to check potential leaks and justify the variability' causes to interventions of works in some buildings and recommendations were given of mechanisms to be implemented for the control of the consumption of the precious liquid.

Keywords: consumption, statistical control, monitoring.

1. Introducción

Recientemente, los temas ambientales han adquirido prioridad en todo tipo de organizaciones, el crecimiento demográfico mundial acelerado y factores socioeconómicos han contribuido a la escasez de agua en todo el mundo, aproximadamente 1/5 de la población mundial no tiene acceso al agua potable, y se pronostica que para el 2025 más de 3/5 de la población mundial afrontará problemas de insuficiencia de agua (Nieto, 2011), todo esto marca la pauta para identificar propuestas de innovación tecnológica en su gestión. La Universidad del Atlántico, siendo una de las más importantes para el departamento del Atlántico, con una población de 23.909 estudiantes en pregrado, 504 estudiantes en posgrado y 1.330 docentes, por su extensión y por las múltiples actividades que se desarrollan, genera un impacto en el medio ambiente. La sede objeto de este estudio fue el campus principal de la Universidad del Atlántico Sede Norte, cuenta con una amplia planta física de 281.956 m² (Universidad del Atlántico, 2019), cuya división administrativa constituida por nueve bloques (edificios) ocho de ellos, identificados con la siguiente nomenclatura: A, B, C, D, E, F, G, H, están constituidos principalmente por salones de clase, pero con algunas oficinas administrativas y dependencias, un bloque para administrativos, un coliseo, un polideportivo y un bloque en construcción al momento de esta investigación: I. Los bloques A, B, C (de ahora en adelante bloque ABC) están unidos y en ellos se dictan clases de la Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Química y Farmacia, asimismo, se encuentran ubicadas la Decanatura de Ciencias Básicas, la Vicerrectoría de Docencia e Investigación, la Facultad de Nutrición y Dietética, los Laboratorios de Física, Química, Microbiología e Ingeniería. Los bloques D y F están unidos y allí se dictan clases de la Facultad de Ciencias Económicas, Ciencias Humanas, Ciencias de la Educación e Ingeniería, en ellos también se encuentran salas de computación, la Facultad de Ciencias Humanas, la Facultad de Ciencias de la Educación, la Facultad de Arquitectura, la Facultad de Ciencias Económicas, el Salón Amílcar Guido Jiménez y la Oficina de Planeación. En el bloque E se albergan clases de la Facultad de Ciencias de la Educación, especialmente del Programa de Licenciatura en Educación Física, Recreación y Deporte; el bloque G constituye la biblioteca y el bloque H alberga clases de la Facultad de Ingeniería, Derecho y Ciencias de la Educación. Existen siete medidores de agua en la Universidad del Atlántico y en este trabajo se nombrarán, según la nomenclatura administrativa original.

Debido a que las universidades son consideradas empresas y para ser sostenibles requieren de conservación y buen uso de sus recursos (Rivas-Marín, 2011), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 1977) anunció que las Instituciones de Educación Superior (IES) deben tener una responsabilidad especial en la protección y gestión del medio ambiente y, por lo general, implementan la normativa ambiental internacional ISO 14001, como se aplica en diversas universidades de Europa, Estados Unidos, Canadá y algunos países de Suramérica. Por lo tanto, para cumplir con dicha normativa se consideran los impactos de las actividades sobre el medio ambiente, y así elaborar un plan para disminuir los impactos generados por su creciente población y los procesos que allí se desarrollan (Rivas-Marín, 2011).

El Informe de Gestión de la Universidad del Atlántico correspondiente al 2018 habla de un consumo total de agua potable facturados de 195.427 m³ (Universidad del Atlántico, 2018), el cual contrasta, por ejemplo, con el consumo presentado por la Universidad del Norte, ubicada en la misma zona geográfica, que fue 151.122 m³ para el mismo año en su campus principal (Universidad del Norte, 2018), es decir, se evidencia despilfarro. Por lo tanto, se requiere una gestión eficiente del recurso en la Universidad del Atlántico, tener con qué detectar problemas como los daños a la infraestructura de redes y proponer soluciones inmediatas, sería de gran utilidad, además, dicho proceso necesita la participación de todas las partes interesadas, como lo plantean los principios de Dublín: La gestión del agua debe inspirarse en un planteamiento basado en la participación de los usuarios, los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles (Solanes, 1998).

El agua cumple un papel importante en los ecosistemas, por consiguiente, es necesario prolongar la construcción de conocimiento en líneas que permitan abordar la gestión integral del recurso hídrico para un desarrollo sostenible (Hernández-Pasichana; Posada-Arrubla, 2018). La Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) busca orientar el desarrollo de políticas

públicas en materia de recurso hídrico, a través de una combinación de desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas, según los lineamientos del Ministerio de Medio Ambiente, en tanto que, el saber técnico-científico es un recurso valioso que debe crearse y administrarse para promover el desarrollo de la producción sustentable (Lagos; Vargas, 2003). Por esto, para el recurso hídrico se han creado herramientas como la “Huella Hídrica” que evalúa la sostenibilidad de los recursos, midiendo el volumen total de agua usada por los habitantes de regiones específicas (Tolón-Becerra; Lastra-Bravo; Fernández-Membrive, 2013), pero no permite monitoreo continuo que dé lugar a acciones inmediatas; la carta de control produce una evolución en ese sentido, la teoría se simplifica y su utilidad gráfica brinda rapidez en el análisis (Álvarez, 2018). A pesar de esto y de la expansión de su uso en el ámbito industrial, se han enfocado en la mejora de los sistemas de monitorización y detección de fugas (Gutiérrez; Pérez-García; Izquierdo; Herrera, 2010); el uso de cartas de control no se ha explorado en este tema, aunque se debe tener un número considerable de datos para usar cartas de control, pero en muchos casos solo se pueden tomar muestras de tamaño $n = 1$ en cada tiempo, debido a las características del proceso. La carta de control para datos individuales o Carta X se usa para este tipo de casos y, además, monitorea el nivel medio del proceso.

Estudios recientes han demostrado que es suficientemente robusta para detectar cambios en la media y en la dispersión del proceso, ya que cuando una medición individual se dispara, afecta directamente los dos rangos móviles en los que participa, por eso se puede utilizar como única carta de control para un proceso, pero, por otra parte, ha demostrado ser sensible a la suposición de normalidad. El presente trabajo tiene como objetivo general monitorear las mediciones de consumo de agua en la Universidad del Atlántico y a través del análisis de su comportamiento estadístico, utilizando cartas de control y así obtener conclusiones válidas que lleven a la implementación de mecanismos que permitan la racionalización del consumo de agua.

2. Estado del arte

Como instituciones de educación superior, las universidades tienen un impacto significativo en la sociedad y pueden tener un papel clave en la provisión de sostenibilidad. En particular, se espera que las universidades “verdes”, contribuyan a la sostenibilidad en mayor medida (Dagiliūtė; Liobikienė; Minelgaitė, 2018). Cabe resaltar que el consumo promedio mensual/vivienda en zonas cálidas se encuentra hoy en día entre 15 y 16 m³, según la compilatoria de normas de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, por su parte, los estratos 4, 5 y 6 tienen actualmente un consumo promedio de 20 m³ (El Herald, 2017).

Farina; Maglionico; Pollastri; Stojkov (2011) en su investigación integran datos cuantitativos del consumo de agua a través de la medición del agua y datos históricos sobre los usuarios de edificios, analizando datos reunidos a lo largo del tiempo y llegando a una aproximación del uso del agua en las escuelas públicas conectadas con los ocupantes de esos edificios contiguos. Existen dos categorías principales de medidas de ahorro de agua para reducir su uso: las medidas técnicas incluyen la mejora de la red, las fugas de reparación, el desarrollo de electrodomésticos que ahorran agua; y las medidas no técnicas que cubren información, educación y conciencia que puede cambiar los hábitos de consumo (Yang *et al.*, 2017).

Otaki; Ueda; Sakura (2017) investigaron métodos para promover la conservación del agua a través de retroalimentación sobre el nivel de consumo de agua a largo plazo. Este estudio realizado en Tokio, donde preocupa la escasez de agua, y se les proporcionaron a los consumidores cuatro tipos de comentarios sobre el nivel de consumo de agua en su comunidad. Estos incluyeron consumo real, consumo promedio, rango de consumo y emoticones con información escrita. La retroalimentación fue enviada cada dos (2) semanas durante un período de veinticuatro (24) semanas. Los resultados indicaron efectividad por parte de los comentarios en consumidores altos y bajos, marcando una pauta en investigaciones sobre la conservación del agua.

Bhakar *et al.*, (2015) analizaron el suministro de agua, su consumo, el reciclaje y el consumo de energía relacionada en una universidad en India, ubicada en zona semiárida. En total, se estimó 2.038.722 L de agua/día de consumo en el campus para el riego y 1.481.424 L de agua para riego/día. Se concluyó que el agua del grifo en los edificios académicos y residenciales fue la principal fuente de impactos.

Cedeño-Viteri; Rodríguez-Aguilar; Sánchez (2012) presentaron una nueva metodología de control estadístico para una planta de tratamiento de aguas residuales que funciona en el espacio variable original. Dicho estudio se centra en el rendimiento de la etapa de detección, que aplica la distancia Mahalanobis de 2 órdenes como prueba estadística, concluyeron que la carga computacional de la etapa de identificación garantiza resultados en tiempo real para las fallas encontradas.

Romano; Woodward; Kapelan (2017) presentaron su metodología de análisis de datos para determinar la ubicación aproximada de una fuga dentro de un sistema de tuberías, Área Medida (DMA). Esta metodología se basa en el control estadístico del proceso (*Statistical Process Control – SPC*) y sistema de ubicación de fuga (LLS) que procesa automáticamente los datos nocturnos grabados cada minuto. Se concluyó principalmente que el LLS permite reducir costos operacionales sustancialmente al reducir área de búsqueda de fugas y reducción del número de reparaciones innecesarias de fugas, mejorar el servicio al cliente a través de comunicaciones más proactivas e informadas y la reducción del número/duración de las interrupciones de suministro y las situaciones de baja presión.

Kofinas; Spyropoulou; Lapidou (2018) generaron datos de consumo de agua en el hogar, el trabajo tuvo lugar en dos estudios de casos, Skiathos, Grecia y Sosnowiec, Polonia, exhibiendo diferencias significativas en los patrones de consumo de agua, mostró efectividad reduciendo brechas entre los datos y valores perdidos, el enfoque usado puede constituir una base potencial para construir una herramienta que apoyará las tareas que demandan grandes series de datos de consumo de agua.

Gutiérrez *et al.*, (2010) analizaron las variaciones en la calidad del agua en una red de distribución. Para ello, se utilizaron técnicas de control estadístico de procesos (*Statistical Process Control - SPC*), con el propósito de detectar y medir desajustes significativos de la variable deseada en el tiempo. Se analizó con cartas de control, la respuesta de la red ante un escenario teórico de entrada de un contaminante, como un primer acercamiento para establecer los posibles estados de alerta y la definición de puntos potencialmente críticos dentro de la red. Se concluyó principalmente que las técnicas de control estadístico de procesos a pesar de ser creadas originalmente en procesos industriales para verificar la calidad de los productos y disminuir las potenciales fallas en la producción, estas pueden aplicarse a otro tipo de eventos, en los cuales, se demande la detección de cambios o desajustes en una variable, siendo en este caso anomalías en la calidad del agua de una red de distribución. El enfoque presentado permitió que, por medio de una carta de control, se detectara y monitoreara la magnitud e intensidad de las variaciones debido a la intrusión del contaminante estudiado.

Las cartas de control estadístico permiten monitorear procesos periódicamente, la celeridad de su respuesta es evaluada a través de la longitud de Corrida o Longitud de Corrida Media, ARL (*Average Run Length*), esta es determinante en la búsqueda de una carta que se ajuste a las características de producción (Quintana; García; Casal, 2011) y se define como el número de puntos graficados en una carta de control hasta que aparezca la primera señal fuera de control. Teóricamente una carta de control bajo características ideales de normalidad tiene un ARL de 370 (Lagos; Vargas, 2003). Las cartas de mediciones individuales y de recorrido móvil son particularmente adecuadas para el estudio de procesos por lotes (Juran; Gryna; Bingham, 2005), estas son diagramas para variables de tipo continuo aplicados a procesos lentos, donde hay un lapso importante entre una medición y otra, por ejemplo, consumo de agua (Gutiérrez; De la Vara, 2013). En procesos destructivos en donde solo es posible tener una medición a la vez, precedente a la construcción de la carta para observaciones individuales, se debe probar la normalidad de los mismos, ya que de otro modo los resultados podrían ser equívocos (Mustafa; Rodríguez; Chauvet, 2002) a causa de la sensibilidad a la suposición de normalidad que presenta esta carta. En este trabajo se utilizó la prueba de normalidad Anderson-Darling, debido a que es una de las pruebas de normalidad más potentes (en particular, la más potente en los paquetes estadísticos utilizados), el tamaño muestral, su efectividad en casos extraordinarios o aberrantes (*outliers*) (Marques, 2011) y la importancia que le da a las colas de distribución, lo cual conlleva a un mejor ajuste; además, esta prueba una mejor capacidad de detección en muestras pequeñas (Pedrosa; Juarros-Basterretxea; Robles-Fernández; Basteiro; García-Cueto, citado por Marques, 2011).

$$A^2 = -n - \left(\frac{1}{n}\right) \sum [(2i - 1) \ln(p_{(i)}) + (2n + 1 - 2i) \ln\{1 - p_{(i)}\}] \quad (1)$$

Una alternativa a la prueba Anderson-Darling es la prueba Kolmogórov-Smirnov, considerada menos potente que la prueba Anderson-Darling, sin embargo, muestra gran eficiencia en la detección de no normalidad en tamaños de muestra medios (n200) (Pedrosa *et al.*, 2015), la estadística de Kolmogórov-Smirnov está definida como (Llinás, 2017):

$$D_n = \max_x |F_n(x) - F(x)| \quad (2)$$

Donde, $F_n(x)$ = Función de distribución acumulada muestral y $F(x)$ = Función de distribución acumulada hipotética.

La carta de control X se define de la siguiente forma (Lagos; Vargas, 2003):

$$LCS = \bar{X} + \frac{3\bar{R}}{d_2} \quad (3)$$

$$LC = \bar{X} \quad (4)$$

$$LCI = \bar{X} - \frac{3\bar{R}}{d_2} \quad (5)$$

$$\text{Donde } \bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad \bar{R} = \sum_{i=1}^n \frac{|R_i|}{(n-1)}$$

Hitchin y Knight (2016), en su trabajo explicaron e ilustraron algunas de las características que son específicas de los sistemas de aire acondicionado y describieron cómo las firmas de energía que los tienen en cuenta se pueden aplicar para producir puntos de referencia, cuadros de control e información para diagnóstico, haciendo énfasis en el uso de firmas de energía originarias del consumo diario de energía del sistema medido. Encontraron que las cartas de control diario proporcionan advertencias, pero no proporcionan información de diagnóstico significativa sobre fallas específicas y que este tipo de información puede ser proporcionada por una firma de energía sub-horaria y por valores residuales de intervalo sub-horario, proporcionando informes de excepción.

Smeti; Koronakis; Golfinopoulos (2007) en su investigación construyeron cartas de control para los datos obtenidos del análisis toxicológico diario del agua tratada (agua que ya ha sido usada para el consumo humano) de los tanques de agua tratada del Abastecimiento de Agua y Alcantarillado de la Corporación de Atenas. La idea básica de las cartas control era probar la hipótesis de que solo existen causas comunes de variabilidad *vs* la alternativa de que hay causas especiales. Las cartas se diseñaron y evaluaron bajo la suposición de que las observaciones del proceso son independientes e idénticas distribuidas normalmente. Se concluyó principalmente que las cartas de control típicas son ineficaces, debido a la existencia de autocorrelación en los datos de toxicidad para los tres tanques de agua tratada. La gran cantidad de autocorrelación que estaba presente en los datos redujo drásticamente el rendimiento de las cartas, dando una gran cantidad de falsas alarmas cuando se estimó a través del rango de movimiento promedio MR y cubriendo las alarmas reales cuando se estimó a través de la muestra de desviación estándar s.

3. Metodología

Se llevó a cabo el control estadístico del consumo de agua potable en la Universidad del Atlántico con el apoyo del Sistema de Gestión Ambiental (SGA) mediante su Programa de Gestión Eficiente del Agua (PGEA), realizando el análisis estadístico y diseño de la carta de control para datos individuales o Carta X, de los históricos específicos a un semestre y por bloque.

3.1 Toma de muestra

Se midió el consumo de agua en metros cúbicos (m³) mediante la lectura de 7 medidores de agua del campus de la Universidad del Atlántico, estas mediciones arrojaron un tamaño de muestra de n=1 en cada tiempo para cada medidor de agua potable. Para el análisis de datos se usaron los softwares STATGRAPHICS Centurion XVI.I y Minitab 18.

Para el diseño de la carta de control, se realizaron lecturas cuatro veces a la semana, obteniendo el consumo de agua de lunes a jueves durante el mes de agosto hasta noviembre del año inmediatamente anterior; tomando el periodo lectivo donde se estaban dando clases con normalidad completando 58 datos medidos por bloque, con los cuales se realizó la evaluación estadística de la estabilidad del proceso y se diseñó la carta de control. Para el control del consumo de agua mensual, se realizaron lecturas durante dos semanas midiendo el consumo tres veces por semana, completando así un total de seis datos.

Para los análisis estadísticos se tuvo en cuenta las actividades normales de cada edificio, los bloques que más consumen agua fueron el ABC, debido a su actividad natural de bloque de ciencias, en dónde se encuentran vinculadas las prácticas de laboratorios, las cuales requieren consumo de agua adicional, el bloque I es inherente a la investigación y por completo su función es esa, sin embargo, es menor, ya que aún no se han trasladados los grupos de investigación al mismo, le siguen el Bloque Administrativo y el Bloque H por la cantidad de personal que permanece y la capacidad, respectivamente. Los que menos consumen son el Coliseo y el Polideportivo, ya que tienen pocos baños, son pequeños y allí es menor la población que ingresa, además, el riego de las canchas del complejo deportivo se realiza con las aguas residuales tratadas.

3.2 Fase I – Diseño de control para proceso

3.2.1 Prueba de normalidad Anderson-Darling

Con el fin de contrastar la hipótesis de normalidad de la población, se realizó prueba de normalidad Anderson-Darling.

3.2.2 Estudio inicial

Esta fase consistió principalmente en la estimación de los parámetros del proceso, pretendiendo establecer si el proceso se encuentra bajo control estadístico mediante el uso de la carta de individuales en este caso.

Primero, se realizó una carta de control para estudio inicial para obtener los parámetros del proceso para cada variable, μ y σ .

3.2.3 Depuración

Seguido al estudio inicial, se procedió a verificar datos atípicos y detectar las causas asignables dentro del proceso.

Una vez detectadas las causas de variabilidad, se procedió a eliminar los datos considerados atípicos con el fin de estabilizar la carta de control del proceso.

3.3 Fase II – Control de operación

Se prosiguió con la Fase II del estudio posterior a la depuración del conjunto de datos, a fin de monitorear las futuras observaciones, para lo cual se realizó monitoreo en línea tomando cuatro datos por cada bloque en una semana.

Se realizaron cartas independientes para cada bloque, teniendo en cuenta que las actividades realizadas son diferentes, además, que se debe reconocer la fecha exacta de cada punto graficado para que el control sea efectivo.

3.3.1 Implementación del control estadístico

Después de determinar el modelo estadístico que seguía el conjunto de datos, se procedió a realizar el control estadístico basado en cartas de control individuales y de rango móvil, es decir, monitorear si la variación de los datos está dentro de los límites esperados para un proceso sin cambios relevantes, todo esto, teniendo en cuenta las parametrizaciones definidas en la fase I.

En esta fase, la carta se usó para determinar si el proceso se encuentra bajo control cuando son extraídas futuras muestras, es decir, una inferencia. No se utilizaron muestras utilizadas en la fase I (estudio inicial).

4. Resultados

4.1 Prueba de normalidad

Mediante el procedimiento de la prueba de Anderson-Darling, realizada con el software Minitab 18, se comparó la función de distribución acumulada observada para cada variable con las distribuciones teóricas determinadas (ver Tabla 1).

Tabla 1.
Prueba de normalidad Anderson-Darling para cada conjunto de datos

Bloque	Valor-P	Bloque	Valor-P
Adm.	0,019	I	0,294
ABC	0,025	Coliseo	0,0048
D	0,011	Polideportivo	0,007
H	0,0047	--	--

Fuente: elaboración propia.

Debido a que el valor-P obtenido a partir de la prueba Anderson-Darling (en la mayoría de los casos) es menor o igual a 0,05, según (1), se puede rechazar la idea de que todos los bloques provienen de una distribución normal con 95 % de confianza. No obstante, teniendo en cuenta la sensibilidad de la Carta X a la suposición de normalidad, se decidió realizar otra prueba de normalidad, la prueba Kolmogórov-Smirnov, con gran eficiencia para el tamaño de muestra del estudio y los resultados obtenidos están concentrados en la Tabla 2.

Tabla 2.
Prueba de normalidad Kolmogórov-Smirnov para cada conjunto de datos

Bloque	Valor-P	Bloque	Valor-P
Adm.	0,419366	I	0,674798
ABC	0,514932	Coliseo	0,0543713
D	0,510508	Polideportivo	0,330186
H	0,232474	--	--

Fuente: elaboración propia.

Debido a que el valor-P más pequeño obtenido para conjunto de datos de la prueba Kolmogórov-Smirnov realizada es mayor o igual a 0,05, según (1), no se puede rechazar la idea de que todos los bloques provienen de una distribución normal con 95 % de confianza.

En vista de los resultados contradictorios entre las pruebas de normalidad aplicadas, se realizó una prueba de comparación de distribuciones alternas, la cual dio como resultado distribuciones gamma y binomial, a partir de los parámetros obtenidos se pudo determinar que se aproximaban a la distribución normal en todos los casos, por lo cual se asumió que todos los conjuntos de datos seguían una distribución normal.

4.2 Diseño de control para el proceso

Se llevó a cabo el diseño de las cartas de control por bloque con el fin de determinar los parámetros establecidos del consumo de agua potable para cada bloque (ver Figuras 1 a 7):

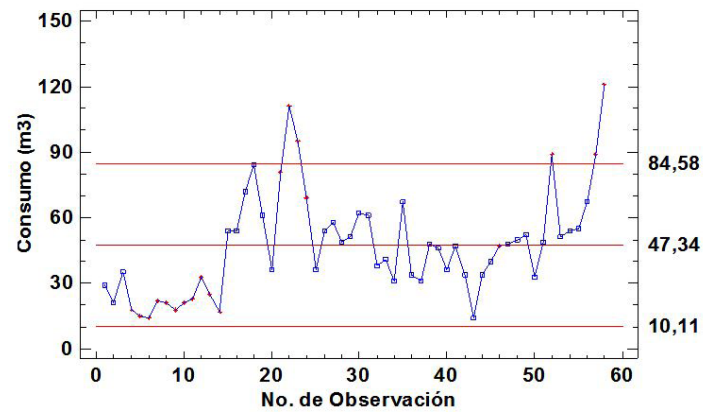


Figura 1. Carta de Control de Individuales para Bloque Administrativo
Fuente: elaboración propia.

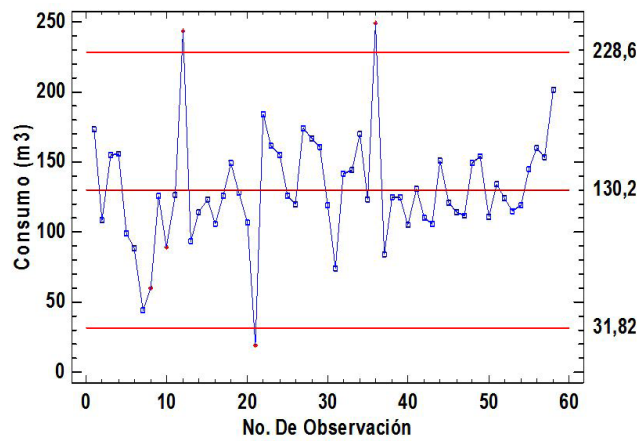


Figura 2. Carta de Control de Individuales para Bloque ABC
Fuente: elaboración propia.

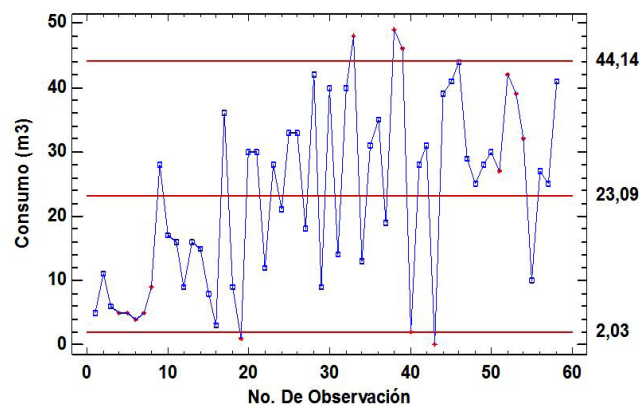


Figura 3. Carta de Control de Individuales para Bloque D
Fuente: elaboración propia.

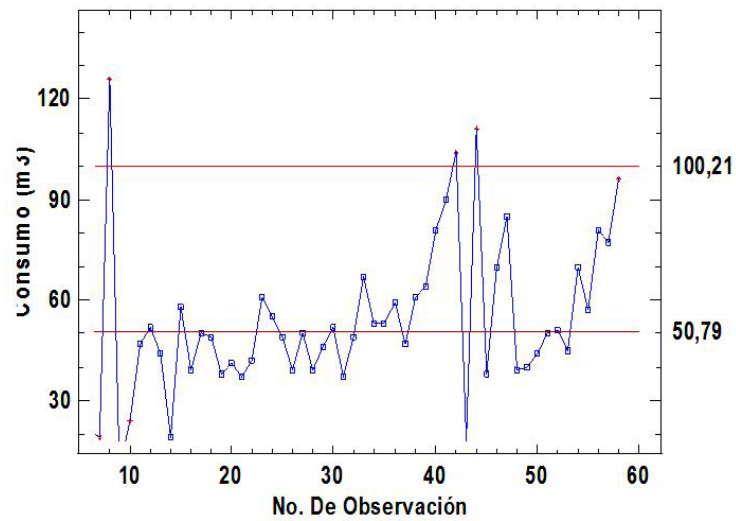


Figura 4. Carta de Control de individuales para Bloque H
Fuente: elaboración propia.

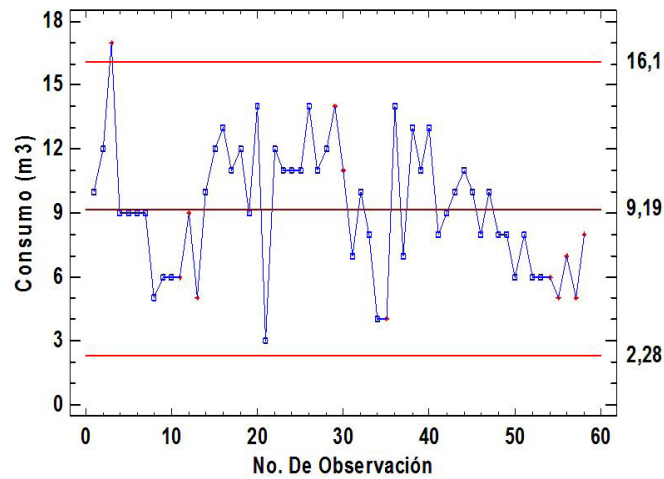


Figura 5. Carta de Control de individuales para Bloque I
Fuente: elaboración propia.

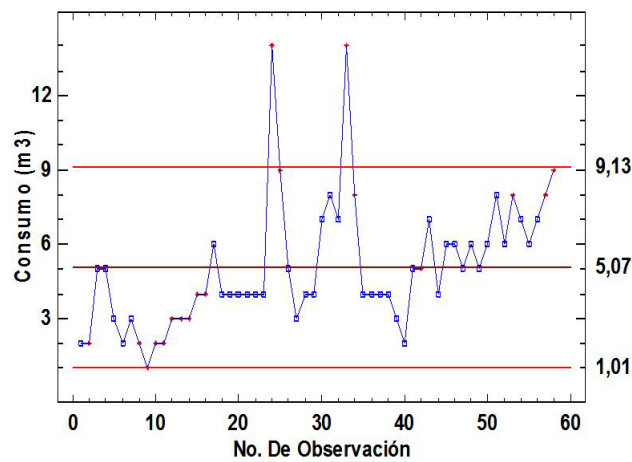


Figura 6. Carta de Control de individuales para Coliseo
Fuente: elaboración propia.

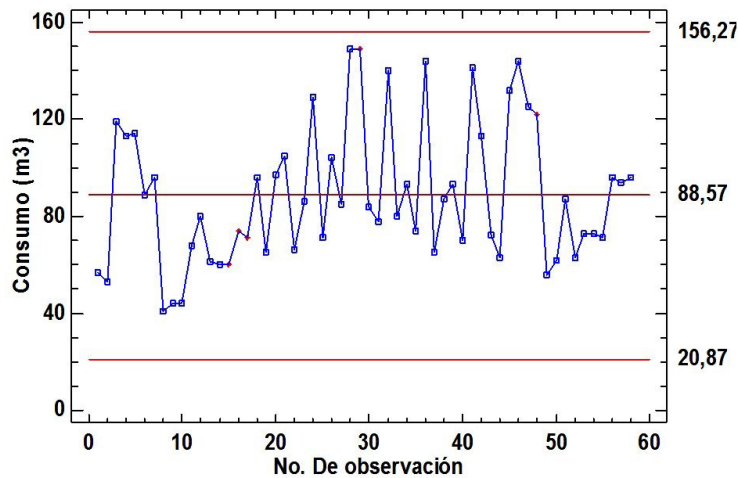


Figura 7. Carta de Control de individuales para Polideportivo
Fuente: elaboración propia.

Las figuras anteriores muestran las cartas de control estabilizadas, dado que los puntos que salen de los límites calculados a través de (3) y (5) no tienen causas asignables, debido a la variación poblacional que no puede ser cuantificada por bloques. Debido a la robustez de la Carta X antes mencionada, se hace útil este análisis, ya que la media de estos datos va a ser variante a medida que pasan los años, gracias al aumento de la población, la cual es proporcional al consumo de agua potable. En la Tabla 3 se evidencian los parámetros asignados a cada bloque luego de la estabilización de las cartas de control.

Tabla 3.
Datos paramétricos de cada carta de control por bloque en el consumo del agua de la Universidad del Atlántico

	Bloque Administrativo		Bloque ABC	Bloque D
μ	47,3448		130,224	23,0862
σ	12,4113		32,8014	11,6959
Media	Bloque H	Bloque I	Bloque Coliseo	Polideportivo
μ	50,7931	9,18966	5,06897	88,569
σ	16,4707	2,30185	1,35312	22,5675

Fuente: elaboración propia.

4.3 Fase II- Control estadístico

Para los datos medidos en el control, por cada bloque se realizó el análisis estadístico controlando los parámetros de las cartas resultantes de la Fase I y se realizó análisis de causas para hallar causas asignables a los *outliers* obtenidos, producto de esto se encontró un consumo estable para los edificios Administrativo, ABC, H, Polideportivo y Coliseo, teniendo este último un solo punto fuera de control, debido a unas obras que se han venido realizando; en la Figura 8 se presenta el control de los bloques ABC, ya que es el más importante para la Universidad del Atlántico, debido al alto consumo de agua potable por la actividad misma de las prácticas en los laboratorios y el número de salones que presentan.

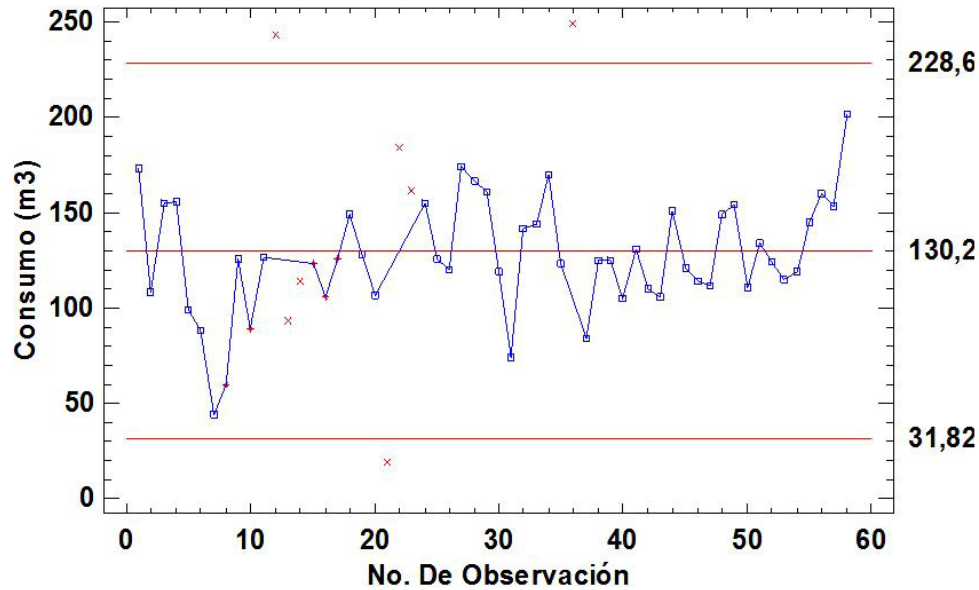


Figura 8. Control de consumo de agua en el Bloque ABC
Fuente: elaboración propia.

Según la Figura 9, el consumo en el bloque I está en control estadístico, esto puede deberse a que el bloque no está en funcionamiento y el consumo de agua se ve limitado a actividades estandarizadas, como incorporación de líneas de aires y gas.

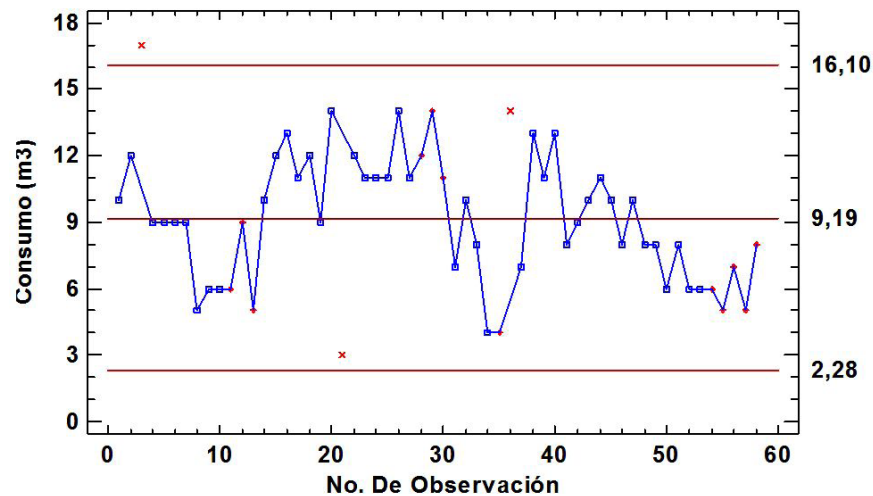


Figura 9. Control de consumo de agua en el Bloque I
Fuente: elaboración propia.

Esta carta de control se seguirá midiendo en los próximos meses para evidenciar el consumo real del agua y la aceptación que pueda tener el uso de las cartas de control. Se puede observar en las cartas de control obtenidas mucha variabilidad en máximos y mínimos proveniente de una variación atribuible presente. Se debe tener en cuenta que la población aumentó en la segunda mitad de las mediciones, ya que esta correspondió a un semestre académico diferente, además de la diversidad de actividades que se realizan en cada bloque, consecuentemente, la recolección de datos de consumo de agua debe realizarse de forma diferente para permitir utilizar otro tipo de carta de control, por ejemplo, la carta de media móvil que permita obtener información para analizar de manera masiva, además, el proceso (consumo de agua) debe ser investigado a fondo teniendo en cuenta factores externos como el clima, y factores internos como actividades rutinarias y/o extraordinarias, eventos especiales, carga estudiantil asignada en clases, etc., ya que debido a su variabilidad

no sirve como fundamento para la realización de pronósticos, sin embargo, esta investigación sienta las bases para generar consecuencia en el *alma mater*, debido a que la variación atribuible puede ser asociada fácilmente con derroche, falta de mantenimiento y adecuación de la red tuberías.

Para que se pueda concluir en resultados de mayor relevancia, se debe realizar un análisis de todas las posibles causas de variación de consumo medibles, en primer lugar, se recomienda utilizar análisis para detección de roturas en la red de distribución de agua de la universidad como el propuesto por Martínez (2015), que permite formular una gestión de presiones que conlleva a la reducción de probabilidad de las roturas de tubería a partir de la relación de los indicadores de presión del agua, con las roturas de tubería y la distinción de los indicadores de mayor significancia en las roturas. Otros factores externos de posible influencia pueden ser obtenidos a través de un análisis de causas completo y estos pueden ser medidos simultáneamente con el consumo de agua, esto con el fin de encontrar que variables son las más relevantes y pueden explicar de la mejor manera la variabilidad del consumo de agua, para dicha tarea la herramienta estadística recomendada es el Análisis de Componentes Principales (ACP), como lo cita Flórez-Vergara, *et al.*, (2018). Otra estrategia válida para implementar este control estadístico es la medición de caudal diurno y nocturno, de este modo se pueden obtener datos mucho más precisos sobre la cultura de consumo.

5. Conclusiones

Con el uso de control estadístico aplicado al consumo de agua de la Universidad del Atlántico, se obtuvo cartas de control en donde se pudo apreciar la gran variación atribuible (no común) que presenta, lo cual deja claro que se están midiendo consumo de agua de muchas actividades diferentes y que además está siendo afectado por factores externos que requieren una investigación más rigurosa, evidenciando la necesidad de un sistema de monitoreo que permita tomar acciones, para lo cual se recomendaron herramientas estadísticas potentes como estrategias de implementación. Se ha deducido a partir de las múltiples actividades necesarias para implementar control estadístico al consumo de agua en la universidad y su complejidad, se requiere la designación de un comité de implementación, con conocimiento idóneo y el diseño de un plan de acción, donde esté contemplado la forma de recolección de datos, el procedimiento de inspección, la elección e implementación de las cartas de control y las acciones a seguir a partir de los resultados obtenidos, todo esto con el fin de medir la efectividad de este control estadístico y las medidas adoptadas con base en él.

6. Referencias

- Alvarez, Antonio (2018). Cambio organizacional y cambio en los paradigmas de la administración. *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades. UAM Iztapalapa.*, 48, 11–34.
- Bhakar, Vikrant; Sihag, Nitesh; Gieschen, Rebekka; Andrew, Stefan; Herrmann, Christoph; Sangwan, K. S. (2015). Environmental impact analysis of a water supply system: Study of an Indian university campus. *Procedia CIRP*, 29, 468–473.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.061>
- Cedeño-Viteri, Marco; Rodríguez-Aguilar, Leandro; Sánchez, Mabel (2012). Statistical Monitoring of Water Systems. *Computer Aided Chemical Engineering*, 31, 735–739.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59507-2.50139-6>
- Dagiliūtė, Renata; Liobikienė, Genovaitė; Minelgaitė, Audronė (2018). Sustainability at universities: Students' perceptions from Green and Non-Green universities. *Journal of Cleaner Production*, 181, 473–482.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.213>
- Farina, Marco; Maglionico, Marco; Pollastri, Marco; Stojkov, Irene (2011). Water consumptions in public schools. *Procedia Engineering*, 21, 929–938.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.213>

- Flórez-Vergara, A.; Díaz-Mercado, J.; Ibarra-Montes, M.; Olivero-Verbel, R.; García-Correa, L. (2019). *Propiedades Físicas de nidos de Acromyrmex rugosus y su efecto sobre el crecimiento de Zea mays L.* Editorial Universidad del Atlántico, Barranquilla.
- Gutiérrez, Humberto; De la Vara, Román (2013). *Control estadístico de la calidad y seis sigma*. México, D.F.: Mc Graw Hill.
- Gutiérrez, Joanna; Pérez-García, Rafael; Izquierdo, Joaquín; Herrera, Manuel (2010). Análisis de eventos de contaminación en redes de abastecimiento de agua con técnicas de control estadístico de procesos. En *I Seminario Iberoamericano de la red IT-AGUA*. Grupo FluIng - IMM - UPV, Valencia España.
- Hernández-Pasichana, Sandra; Posada-Arrubla, Adriana (2018). Avances de la investigación sobre la gestión integral del recurso hídrico en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 553-563. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1079>
- Hitchin, Roger; Knight, Ian (2016). Daily energy consumption signatures and control charts for air-conditioned buildings. *Energy and Buildings*, 112, 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.059>
- El Heraldo. (2017). *Barranquilla reduce su consumo de agua un 30,7%*. Recuperado de: <https://www.pressreader.com/colombia/el-heraldo-olombia/20170322/2815093410088001/1>.
- Kofinas, Dimitris; Spyropoulou, Alexandra; Laspidou, Chrysi (2018). A methodology for synthetic household water consumption data generation. *Environmental Modelling and Software*, 100, 48-66. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.021>
- Lagos, Ingrid; Vargas, José (2003). Sistema de familias de distribuciones de Johnson, una alternativa para el manejo de datos no normales en cartas de control. *Revista Colombiana de Estadística*, 26(1), 25-40.
- Llinás, Humberto (2017). *Estadística Inferencial*. Barranquilla, Colombia: Editorial Universidad del Norte. 278.
- Marques, María. (2011). *Estadística Basica Un enfoque no parametrico*. México D.F.: UNAM, 42.
- Martínez, Ángela (2015). *Metodología de análisis estadístico de roturas en redes de distribución de agua* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Mustafa, Ana; Rodríguez, Norma; Chauvet, Susana (2002). Control de calidad : Cartas de control por variables. En *Congreso regional de ciencia y tecnología NOA*. Universidad Nacional de Catamarca, Argentina. 1-17. Recuperado de <http://editorial.unca.edu.ar/Publicacione%20on%20line/CD%20INTERACTIVOS/NOA2002/Control%20Calidad%20Cartas.pdf>
- Juran, J. M.; Gryna, F.; Bingham, R. S. (2005). *Manual de Control de Calidad*. Barcelona, España: Reverté, 946.
- Nieto, Nubia. (2011). La gestión del agua: tensiones globales y latinoamericanas. *Política y Cultura*, (36), 157-176. Recuperado de 2019, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-77422011000200007&lng=es&tln g=es.
- Otaki, Yurina; Ueda, Kazuhiro; Sakura, Osamu (2017). Effects of feedback about community water consumption on residential water conservation. *Journal of Cleaner Production*, 143, 719-730. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.021>

- Pedrosa, Ignacio; Juarros-Basterretxea, Joel; Robles-Fernández, Adán; Basteiro, Julia; García-Cueto, Eduardo (2015). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas Psychologica*, 14(1), 245-254.
<https://doi.org/10.11144/Javeriana.upsy14-1.pbad>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (1977). *Conferencia Intergubernamental sobre Educación Ambiental, Tbilisi*. URSS, 14-26 de octubre de 1977: informe final. Recuperado de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000032763_spa
- Quintana, Alicia; García, Liliana; Casal, Ricardo (2011). Variabilidad lateral para evaluar la velocidad de lateral. *Revista Ingeniería Industrial* 10(2), 31-48.
- Rivas-Marín, María (2011). Modelo de sistema de gestión ambiental para formar universidades ambientalmente sostenibles en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 14(1), 151-162. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/25453/39275>
- Romano, Michele; Woodward, Kevin; Kapelan, Zoran (2017). Statistical Process Control Based System for Approximate Location of Pipe Bursts and Leaks in Water Distribution Systems. *Procedia Engineering*, 186, 236-243.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.235>
- Smeti, Eleni; Koronakis, Demetrios; Golfinopoulos, Spyridon (2007). Control charts for the toxicity of finished water-Modeling the structure of toxicity. *Water Research*, 41(12), 2679-2689.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.235>
- Tolón-Becerra, Alfredo; Lastra-Bravo, Xavier; Fernández-Membrive, Victor (2013). Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. Aplicación al Poniente Almeriense. Estudios previos y medidas de eficiencia. *M+A. Revista Electronic@ de Medio Ambiente*, 14(1), 56-86. Recuperado de <http://revistas.ucm.es/index.php/MARE/article/view/42123/40102>
- Universidad del Atlántico. (2013). *Infraestructura de la Universidad del Atlántico*. Recuperado de <https://www.uniatlantico.edu.co/uatlantico/node/1709>
- Yang, Lili; Yang, Shuang-Hua; Magiera, Ewa; Froelich, Wojciech; Jach, Tomasz; Laspidou, Chrysi (2017). Domestic water consumption monitoring and behaviour intervention by employing the internet of things technologies. *Procedia Computer Science*, 111, 367-375.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.06.036>