

ENFOQUE

UTE
REVISTA



Facultad Ciencias de la Ingeniería e Industrias
eISSN:13906542



Volumen 11 • N°4 • Octubre 2020

Sumario

UN MODELO HÍBRIDO DE RECOMENDACIÓN DE ETIQUETAS PARA SISTEMAS DE ANOTACIÓN SOCIAL (A Tag Recommendation Hybrid Model for Social Annotation Systems) <i>E. Portilla, D. Godoy</i>	1
DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN GATEWAY MÓVIL IoT PARA REDES 4G LTE Developing and evaluation of an IoT mobile gateway for 4G LTE networks <i>Manuel Quiñones-Cuenca, Hever Patricio Pachar Bravo, Javier Martínez-Curipoma, Luis Quiñones, Rommel Torres</i>	16
MASS TRAPPING OF <i>PECTINOPHORA GOSSYPIELLA</i> (SAUNDERS) (LEPIDOPTERA: GELECHIIDAE) USING LIGHT AND SEX-PHEROMONE TRAPS IN COTTON (Captura masiva de <i>Pectinophora gossypiella</i> (Lepidoptera: Gelechiidae) utilizando trampas ligeras de feromonas sexuales en el algodón) <i>Muhammad Arshad, Muhammad Irfan Ullah, Muhammad Wasim Abbas, Asad Abdullah, Usama Hassan</i>	27
ESTUDIO COMPARATIVO PARA PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE <i>CHONDRACANTHUS CHAMISSOI</i> “YUYO” SOBRE TRES TIPOS DE SUSTRATO EN AMBIENTE CONTROLADO Y SU VIABILIDAD EN LA REGIÓN MOQUEGUA (Comparative study for vegetative propagation of <i>Chondracanthus chamissoi</i> “Yuyo” on three types of substrate in a controlled environment and its viability in the Moquegua region) <i>Jose Carlos Zapata-Rojas, Alejandro Marcelo Gonzales-Vargas, Sheyla Amanda Zevallos-Feria</i>	37
PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND MICROBIAL GROUP BEHAVIOR OF POSTHARVEST PERUVIAN COCOA BEAN (<i>THEOBROMA CACAO</i> L.) Propiedades fisicoquímicas y comportamiento de grupos microbianos en la poscosecha del cacao peruano (<i>Theobroma cacao</i> L.) <i>Eduardo Salazar, Roxana Valenzuela, Margarita Aguilar, Natali Aranda, Alejandrina Sotelo, Gabriela Chire, Milber Ureña</i>	48
ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO E INFLUENCIA DE LOS MINERALES DISUELTOS EN EL SABOR DEL AGUA POTABLE, DE LAS PRINCIPALES PLANTAS DE TRATAMIENTO DE QUITO (Physical - chemist analysis and influence of dissolved minerals on the tap water taste from Quito’s principals treatment plants) <i>Stephanie Torres-Silva, Ivan Tapia-Calvopiña, Lorena Goetschel-Gomez, Edgar Pazmiño-Salazar</i> ...	57
INCREMENTO DE LA TERMOTRANSFERENCIA EN UN SISTEMA DE ENFRIADORES ENCHACUETADOS, OPTIMIZANDO LOS FLUJOS DE AGUA (Heat transfer incremental on a jacketed coolers system through optimization of the water flowrates) <i>Andrés A. Sánchez-Escalona, Yanán Camaraza-Medina, Yoalbys Retirado-Mediaceja, Ever Góngora-Leyva</i>	71
CARACTERÍSTICAS DE LA ARENA SÍLICA DE ALVARADO, VERACRUZ, MÉXICO, COMO MATERIAL PARA BARRERAS REACTIVAS PERMEABLES, PARA LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS CON LIXIVIADOS DE BASUREROS NO CONTROLADOS (Characteristics of Silica Sand from Alvarado, Veracruz, Mexico as material for Permeable Reactive Barriers for the Remediation of Aquifers contaminated with leachates from uncontrolled landfills) <i>Manuel Alberto Susunaga-Miranda, Bertha María Estévez-Garrido, Rodrigo Manuel Susunaga-Estévez</i>	87

EFFICIENT PREDICTION AND ANALYSIS OF THE POSSIBLE EVOLUTION OF THE SARS-CoV-2 IN COVID-19 APPLYING THE SEIR MODEL IN SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS, ECUADOR (Predicción y análisis eficiente de la posible evolución del SARS-CoV-2 en COVID-19, aplicando el modelo SEIR en Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador)	
<i>Moisés Filiberto Mora Murillo, Walter Alfredo Mora Murillo, Digvijay Pandey.....</i>	<i>101</i>
EVALUACIÓN DE LAS DEFORMACIONES Y SU PRONÓSTICO EN EL TURBO GENERADOR 5, DE LA PLANTA TERMO-ENERGÉTICA DE NUEVITAS, CAMAGÜEY (Deformations evaluations and forecast in Turbo Generator 5 in the thermic-energetic plant of Nuevitas, Camagüey)	
<i>Michael Álvarez González, Vladimir Mederos Pérez , Miguel Ángel Hernández Machado y Rafael Matamoros García</i>	<i>116</i>

Un modelo híbrido de recomendación de etiquetas para sistemas de anotación social

(A Tag Recommendation Hybrid Model for Social Annotation Systems)

E. Portilla¹, D. Godoy²

Resumen

El etiquetado social consiste en clasificar recursos web, con el uso de palabras o etiquetas libremente elegidas por los usuarios. La simplicidad y apertura de los sistemas de etiquetado social para organizar recursos, es la clave de su éxito en Internet. Existen numerosos enfoques para facilitar al usuario el proceso de etiquetado, permitiéndole reutilizar etiquetas y optimizando así su limitado tiempo de lectura y escritura. Este documento propone un enfoque híbrido diferente, que resuelve de forma sencilla el problema de las recomendaciones basadas únicamente en el contenido del recurso, fusionando la lista de recomendaciones con las etiquetas más populares del historial de etiquetas del usuario, permitiéndole así reutilizar los términos asignados a otros recursos.

Palabras clave

Folcsonomía; *Tagging* Social; Historial de etiquetado del usuario.

Abstract

Social tagging consists of classifying web resources using words or tags freely chosen by users. The simplicity and openness of social tagging systems to organize resources is the key to your success on the internet. There are numerous approaches to facilitate the user the labeling process, allowing them to reuse labels and thus optimizing their limited reading and writing time. This document proposes a different hybrid approach that simply solves the problem of recommendations based solely on the content of the resource, merging the list of recommendations with the most popular tags in the user's tag history, thus allowing them to reuse terms assigned to others resources.

Keywords

Folksonomy; Social Tagging; User's tagging history.

1. Introducción

Tagging o etiquetado social es una de las técnicas de clasificación de información más populares en la actualidad y ha sido implementado exitosamente en aplicaciones web de uso masivo como BibSonomy (<https://www.bibsonomy.org/>), Flickr (<https://www.flickr.com/>), entre otras, que permiten a los usuarios etiquetar y luego localizar páginas web, publicaciones académicas, objetos multimedia, entre otros tipos de recursos. Entre las ventajas del etiquetado social se destaca, que ayuda a clasificar y organizar recursos desde el punto de vista del usuario, y optimiza el limitado tiempo de lectura que este requiere para clasificar un recurso. Según Gou, Han, Zhu, Yang y Duan (2018) el proceso de etiquetado y las posteriores búsquedas de documentos etiquetados pueden ser, a su vez, personalizados en base al perfil del usuario.

Para facilitar la tarea de etiquetar recursos y atenuar problemas causados por la ambigüedad, sinonimia, polisemia y falta de normalización lingüística de las etiquetas elegidas

1 Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. [eportilla@uteq.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-5228-1658>]

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet). Argentina / Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Argentina. [dgodoy@exa.unicen.edu.ar, <https://orcid.org/0000-0002-5185-4570>]

por los usuarios, algunos sitios web de etiquetado social han implementado el servicio de recomendación de etiquetas, que consiste en mostrar al usuario una lista de las etiquetas más relevantes para clasificar un recurso dado. Con el fin de mejorar este servicio, se ha realizado abundantes trabajos de investigación, sobre la base de enfoques clásicos de la construcción, de Sistemas de Recomendación (SR).

El aporte de este trabajo es mostrar que el historial de etiquetado del usuario puede utilizarse de una manera sencilla y aun así efectiva, para complementar modelos de recomendación basados en contenido, de manera que se obtengan modelos de recomendación híbridos basados en el contenido del recurso a etiquetar y en el historial de etiquetas del usuario. El idioma que se utiliza para el modelo de recomendación es el inglés, en el cual están también varios recursos utilizados, como el conjunto de datos de entrenamiento, el diccionario digital Wordnet 3.0³ y la stoplist (lista de términos irrelevantes) de SQL Server.

El resto de este artículo se organiza como sigue: La sección 2 describe algunos trabajos relacionados con la recomendación de etiquetas basada en contenido y en historiales de etiquetas de los usuarios o de los recursos. La sección 3 explica brevemente algunos conceptos vinculados al trabajo propuesto. La sección 4 expone la metodología de experimentación y se refiere al conjunto de datos utilizado para ello. En la sección 5 se explica el modelo de recomendación propuesto, que incorpora el historial del usuario para realizar las recomendaciones de etiquetas, a un modelo previo basado en contenido. La sección 6 narra los resultados experimentales obtenidos, describiendo previamente la línea base o de referencia y las métricas de evaluación. En la sección 7 se proporciona una discusión sobre la interpretación de lo estudiado. Las conclusiones logradas y el planteamiento de posibles trabajos futuros se muestran en la sección 8.

2. Trabajos relacionados

Los sistemas de etiquetado social se componen de un conjunto de triplas (usuario, recurso, etiqueta), conocidas como asignaciones de etiquetas. Formalmente, una folcsonomía se define como la tupla $\mathbf{F} := (U, T, R, Y, \prec)$, formada por el conjunto de los usuarios U , el de los recursos R , el de las etiquetas T , y el de las asignaciones de etiquetas a recursos, dadas por una relación ternaria entre ellos $Y \subseteq U \times T \times R$ (Hotho, Jäschke, Schmitz, & Stumme, 2006). En esta folcsonomía, \prec es un relación específica de subsunción entre las etiquetas de un usuario, $\prec \subseteq U \times T \times T$.

La personomía P_u de un usuario $u \in U$ es la restricción de \mathbf{F} a u ; es decir, $P_u := (T_u, R_u, I_u, \succ_u)$ con $I_u := \{(t, r) \in TXR \mid (u, t, r) \in Y\}$. Siendo T_u las etiquetas del usuario u , R_u los recursos del usuario, y \succ_u las relaciones entre etiquetas para ese usuario (Hotho, Jäschke, Schmitz, & Stumme, 2006). Es decir, que una personomía es la colección de recursos, etiquetas y asignaciones de etiquetas realizadas por un único usuario, mientras que la colección de personomías se denomina folcsonomía (Zhang, Zhang, & Tang, 2009). Las folcsonomías, según Peng y Zeng (Peng & Zeng, 2010), en contraparte a las taxonomías como el ODP (Open Directory Project), son una opción que aprovecha el conocimiento de la comunidad para organizar y localizar información en la Web.

La recomendación de etiquetas en sistemas de etiquetado social es un tema abordado en numerosos enfoques de investigación, incluidos en distintas revisiones del estado del arte como (Godoy & Corbellini, 2016; Zhang, Tao, & Yi-Cheng, 2011; Belem, Almeida, & Goncalves, 2017). Algunos de estos enfoques se basan en Filtrado Colaborativo (FC), con el fin de hacer predicciones sobre una matriz bidimensional de opiniones de los usuarios. Otros enfoques se

3 <http://wordnet.princeton.edu/>

centran solo en contenidos, diferentes modelos híbridos que aprovechan el FC y el contenido de los recursos, y otros que proponen utilizar recursos adicionales como diccionarios digitales u ontologías (Qassimi & Abdelwahed, 2019; Godoy & Corbellini, 2016). Varias investigaciones sustentan que la mayor cantidad de términos utilizados por el usuario para etiquetar recursos, existen en el contenido de los mismos y en el historial de etiquetas del usuario (Hong, Chi, Budiu, Pirolli, & Nelson, 2008; Lipczak, 2008; Ju & Hwang, 2009). Recientemente, se han propuesto trabajos que explotan las redes sociales (Liu, 2018) como recurso disponible.

Los enfoques basados en FC requieren la inclusión de una nueva dimensión a la tradicional matriz de usuarios y recursos, que está dada por las asignaciones de etiquetas entre ellos. En varios trabajos en la literatura, se han utilizado técnicas clásicas de FC, aplicadas a proyecciones de la matriz de menor dimensionalidad (Godoy & Corbellini, 2016). Otro ejemplo es TAGme (Singh, Nagwani, & Pandey, 2017), un método de recomendación de etiquetas en comunidades de pregunta-respuesta, que consta de tres etapas: se construyen folcsonomías de tópicos con la base de usuarios, etiquetas y tópicos de los *posts*; luego, estas folcsonomías se usan para construir una matriz de perfiles de tópicos y otra de perfiles de usuarios por tópico. Finalmente, se utiliza Filtrado Colaborativo para la recomendación de etiquetas sobre el historial de tópicos de los usuarios.

Un problema asociado a los sistemas de recomendación es el conocido como arranque en frío (*cold-start*), que ocurre cuando un usuario aún no da etiquetas o un recurso aún no recibe suficientes etiquetas, por lo que no es posible realizar buenas recomendaciones a partir de la matriz usuario-recurso. En tal caso, el enfoque basado en contenido u otras dimensiones adicionales, como en Wang, Jin, Wnag, Pengi & Wnag (2018, donde se modela la dinámica temporal y la popularidad de las etiquetas, permiten aliviar este problema.

Varios trabajos se enfocan en el uso de distintos elementos de contenido para la recomendación de etiquetas. Tag2Word (Wu, Yao, Xu, Tong, & Lu, 2016) es un modelo generativo basado en la coocurrencia de etiquetas en el contenido. En el trabajo presentado por Ju & Hwang (2009), los autores plantean un enfoque donde se construye una lista de recomendación a partir de tres fuentes de información:

- a. El contenido del documento.
- b. Las etiquetas usadas por otros usuarios para etiquetar el mismo recurso.
- c. Las etiquetas usadas por el mismo usuario para anotar otros recursos.

Los términos finales son fusionados mediante una función lineal, que pondera los términos de cada fuente con coeficientes escogidos por observación directa sobre la base de cálculos preliminares. Observan que la fuente de información que mayor calidad aporta a la lista final de recomendación es el contenido del recurso a etiquetar (fuente a), seguida de las fuentes c y b, respectivamente.

Sood, Owsley, Hammond y Birnbaum (2007) proponen un sistema de recomendación de etiquetas denominado TagAssist, que proporciona recomendaciones de etiquetas para nuevos *posts* en un blog, aprovechando *posts* etiquetados previamente. TagAssist aplica el algoritmo de stemming de Porter (1980) para reducir el conjunto de términos a su raíz morfológica y Razonomiento Basado en Casos, para determinar el contexto al que se refieren las raíces obtenidas. Toman como línea base la recomendación de etiquetas de mayor frecuencia en el recurso a anotar. De manera similar, Mishne (2006) plantea, aunque sin considerar el historial de etiquetado del usuario, una herramienta llamada AutoTag, que sugiere etiquetas para *posts* en un *weblog* en un proceso en el que se destacan los siguientes pasos:

- a. Selección de *posts* similares al recurso a etiquetar.
- b. Extracción de los términos de mayor frecuencia en los *posts* seleccionados.
- c. Incremento a un factor constante del puntaje de las etiquetas usadas en otros *posts*.
- d. Estructuración de la lista de recomendación con las etiquetas de mayor peso.

Musto, Narducci, Gemmis, Lops y Semeraro (2009) exponen un sistema denominado STaR (Social Tag Recommender), que realiza recomendación basada en contenido, considerando la similitud de los recursos en la personomía y en la folcsonomía, además de la actividad de etiquetado previa del usuario. El pesado de términos se realiza aplicando un enfoque de bolsa de palabras o *bag of words*, en el que todas las palabras tienen el mismo peso sin importar su ubicación (título, subtítulo, entre otras) en el documento.

El aprovechamiento de los contenidos de los recursos y de las etiquetas utilizadas por los usuarios, se aborda también en (Godoy & Amandi, 2008); en este caso para complementar los perfiles de usuario basados en contenido con las etiquetas frecuentemente utilizadas por los usuarios, a fin de que los perfiles permitan mejorar la interacción de los usuarios con un sistema de etiquetado colaborativo. El enfoque citado se compara con dos enfoques comunes en las folcsonomías que son: *tags* (o etiquetas) más populares entre usuarios (MPTU) y *tags* más populares por recurso (MPTR). Demuestran que el perfilado híbrido otorga mejores resultados que MPTR y MPTU.

En el trabajo de recomendaciones basadas en contenido descrito en (Portilla Olvera & Godoy, 2012), se evalúan seis esquemas de pesado para las palabras del texto de un recurso, a fin de recomendarlas como posibles etiquetas. El estudio se centra en la ponderación de términos según su frecuencia en diferentes componentes del HTML (título, body, URL, entre otros), las funciones gramaticales (sustantivo, verbo, adverbio, entre otras), que cumplen los términos y pesos aprendidos por regresión lineal, para establecer la importancia de los elementos del HTML y de las funciones gramaticales. La lista de recomendación se construye con los términos de mayor peso en el recurso a etiquetar. En tal enfoque resultó como segundo mejor esquema de pesado de palabras, al que pondera la estructura HTML y la función gramatical sustantivo, destacando que los términos que cumplen tal función gramatical son sustancialmente mejores candidatos para ser incluidos en la lista de recomendación.

En este trabajo se propone un método de recomendación de etiquetas basado en dos fuentes de información:

- a. El contenido del recurso a etiquetar.
- b. El historial de etiquetado del usuario.

La primera fuente permite abordar el arranque en frío del lado del usuario, realizando recomendaciones incluso cuando el usuario sea nuevo en el sistema; es decir, que no haya anotado aún recursos o solo una pequeña cantidad que no permita determinar sus preferencias. Para obtener las recomendaciones del contenido del recurso se implementa el enfoque de pesado de sustantivos y estructura HTML, descrito en Portilla Olvera & Godoy (2012). La segunda fuente se utiliza para enriquecer la lista de recomendaciones extraídas del contenido, con las etiquetas más populares entre los documentos más similares al recurso a etiquetar, dentro de la personomía del usuario. De esta forma el método planteado puede utilizarse también para abordar el arranque en frío del lado recurso, que ocurre cuando el recurso a etiquetar no contiene suficiente información que permita construir una lista de recomendación.

3. Conceptos relacionados

A. El Modelo de Espacio de Vectores

El Modelo de Espacio de Vectores (Salton, Wong., & Yang, 1975) (VSM), actualmente muy utilizado en el área de Recuperación de Información, permite representar textos de forma que cada documento d_j se corresponde con un vector de términos t_1, t_2, \dots, t_n donde n es el total de términos en el vocabulario. Para cada término perteneciente a un documento, se almacena un peso en el vector que representa al documento, en la dimensión correspondiente al término. El peso almacenado puede ser un valor entre 0 y 1, u otro que represente la importancia del término en el documento. Generalmente, el vocabulario de términos se construye extrayéndolos del total de documentos, de forma que ningún término del vocabulario se repita. La representación de un documento o página web d_j sería:

$$d_j = (w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj}) \quad (1)$$

donde w_{ij} es el peso del término i en el documento j . Dados los vectores de dos documentos, es posible computar una medida de similitud entre ambos mediante los pesos asignados a sus elementos. Tal medida de similitud podría ser el producto interno de los dos vectores o una función inversa del ángulo entre ambos, produciendo el máximo grado de similitud cuando el ángulo sea cero.

B. Métrica de similitud del coseno y técnica TF

Una medida de similitud comúnmente aplicada en el VSM es la métrica del coseno definida como:

$$\text{sim}(v_a, v_b) = \cos \theta = \frac{v_a v_b}{\|v_a\| \|v_b\|} = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ia} w_{ib}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n w_{ia}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n w_{ib}^2}} \quad (2)$$

Donde θ es el ángulo entre los vectores v_a y v_b , y los elementos w son los pesos asociados a los términos en cada vector. Entre las formas comunes de pesado de términos se destacan aquellas basadas en frecuencia (Salton, Wong., & Yang, 1975), como lo es TF (Term Frequency), que mide la frecuencia de un término en un documento, y se normaliza mediante el total de términos del documento, sin contar las *stopwords*.

C. Algoritmo de regresión lineal

El algoritmo de regresión lineal de Microsoft deriva del algoritmo de árboles de decisión (Albarán & Eduard, 2008). Para lograr la regresión lineal, los parámetros del algoritmo se controlan para restringir el crecimiento del árbol y mantener todos los datos en un nodo único y sin ninguna bifurcación, de modo que el conjunto de datos completo se utiliza como un único grupo, para calcular las relaciones en el paso inicial. Todos los datos residen en el nodo raíz (Veerman, Lachev, & Sarka, 2009). Así, el algoritmo no crea nunca una división y, por tanto, efectúa una regresión lineal que calcula una relación lineal entre una o más variables independientes y una dependiente y, a continuación, utiliza esa relación para la predicción.

D. Stopwords y Stoplists

Los vectores que representan documentos pueden alcanzar una muy alta dimensionalidad en el espacio de vectores. Una forma de reducir la dimensionalidad consiste en la eliminación de *stopwords*, que son palabras que por su alta frecuencia de repetición en un documento, y bajo valor discriminatorio, no contribuyen a la determinación del contexto o del tema del recurso, y por tanto deben ser retiradas durante la indexación del conjunto de datos y el procesamiento de consultas (Lo, He, & Ounis, 2005). La remoción de esta clase de palabras se realiza contrastando cada término del contenido de un recurso contra una lista de *stopwords* o *stoplist*.

4. Metodología

Como se indicó antes, en este trabajo se propone un método de recomendación de etiquetas basado en dos fuentes de información:

- a. El contenido del recurso a etiquetar.
- b. El historial de etiquetado del usuario.

Para obtener las recomendaciones del contenido del recurso, se implementa el enfoque de pesado de la función gramatical sustantivo y de la estructura HTML, descrito en Portilla Olvera & Godoy (2012). La incorporación de recomendaciones en base a sobre la base del historial de etiquetado del usuario, constituye la idea principal de este trabajo, cuyo objetivo es complementar las recomendaciones basadas en contenido, con recomendaciones basadas en el historial del usuario, mediante un método sencillo pero efectivo, que provoque mejoras en la lista de recomendaciones.

Para evaluar el enfoque propuesto y la línea base, se utilizaron las instancias de etiquetado de diciembre del 2007 del conjunto de datos DAI-Labor Delicious Corpus⁴, pre-procesado de la forma descrita en (Portilla Olvera & Godoy, 2012), obteniendo así 90,618 instancias de etiquetado, 8,963 recursos y 40,586 *tags* entre las personomías de los 120 usuarios más prolíficos.

5. Modelo de recomendación propuesto

El modelo híbrido de recomendación de etiquetas propuesto, ilustrado en la figura 1, construye una lista de recomendación basada en dos fuentes:

- a. El contenido del recurso a etiquetar.
- b. El historial de etiquetado del usuario.

Los ítems obtenidos de la primera fuente se ponderan mediante un esquema propuesto en Portilla Olvera & Godoy (2012), pesando los términos que cumplen la función gramatical sustantivo y la ubicación de los términos en la estructura del HTML. Los ítems obtenidos de la segunda fuente, es decir del historial del usuario, corresponden a las etiquetas más populares entre los documentos más similares al recurso a etiquetar dentro de la personomía del usuario, por lo cual se toma el texto del recurso como el vector de consulta. El modelo de recomendación contempla dos fases que son:

4 <http://www.dai-labor.de/>. El dataset DAI-Labor Delicious Corpus completo se describe y analiza en (Wetzker, Zimmermann, & Bauckhage, 2008).

- a. Aprendizaje.
- b. Predicción o recomendación.

En la fase de aprendizaje, se obtiene tanto los pesos requeridos para ponderar la estructura HTML de los recursos web, como para ponderar la función gramatical sustantivo de los términos. En la fase de predicción o recomendación, un grupo de procesos construye una sublista de recomendación basada en el contenido del recurso a etiquetar, mientras que paralelamente otro grupo de procesos recupera, del historial de etiquetado del usuario, los k documentos más similares al recurso a anotar, con el fin de extraer de tales documentos otra sublista con las etiquetas más populares. Ambas sublistas se fusionan luego mediante tres pasos:

- a. Impulsión.
- b. Reemplazo.
- c. Complementación.

Conformando así la lista final de recomendación mostrada al usuario. Las fases de aprendizaje y predicción utilizan recursos comunes, como las *stoplists*, mediante las cuales se filtran las palabras irrelevantes y la base de datos léxica Wordnet 3.0, utilizada para determinar los términos que son sustantivos. A continuación se explica con mayor detalle las fases de aprendizaje y de predicción o recomendación.

A. Fase de aprendizaje de pesos

En la fase de aprendizaje, que se realiza en modo *offline*, se determinan por regresión lineal, los pesos para ponderar los elementos HTML y la función gramatical sustantivo de los términos. Como se observa en la figura 1, para la fase de aprendizaje se debe contar con un conjunto de datos de entrenamiento, que luego de ser descargado desde Internet, pasa por un proceso de extracción de términos, donde al mismo tiempo que se extrae cada término de cada tipo de componente HTML (título, URL, *body*, *links*, metadatos *keywords* y metadatos *description*), se calcula el valor TF del término respectivo en cada tipo de componente. Los términos extraídos se guardan en una base de datos relacional.

El proceso A1 ilustrado en la figura 1 se realiza mediante un componente de software implementado con la clase Term Extraction de Microsoft Integration Services 2008. Este componente toma como entrada una *stoplist* de referencia para omitir términos irrelevantes. En cuanto los términos se han almacenado en la base de datos, se determina mediante el proceso A2, si cumplen la función gramatical sustantivo, utilizando para ello la base de datos léxica WordNet.

El proceso A3 actúa sobre el conjunto de datos relacional, que almacena los términos clasificados por componente HTML y por ser o no sustantivos. Se utiliza el algoritmo de minería de datos de regresión lineal de Microsoft Analysis Services 2008 para aprender los pesos para ponderar los componentes HTML y los términos que cumplen la función gramatical sustantivo. Se concuerda con lo expuesto por Levandoski, Ekstrand, Ludwig, Eldawy, Mokbel, y Riedl (2011), en donde el uso de un conjunto de datos relacional es viable para la recomendación basada en filtros sobre los metadatos (documento etiquetado y el usuario que realizó el etiquetado), de la etiquetas. Al estar indexadas por usuario y documento, las recomendaciones se pueden recuperar rápidamente con veloces funciones de búsqueda de texto embebidas en el motor de base de datos.

Preparación del conjunto de datos para el aprendizaje de pesos: Los pasos A1 y A2 ilustrados en la figura 1, constituyen la preparación del conjunto de datos para el aprendizaje de pesos que se efectúa en el paso A3. El modelo contempla que para tal proceso se requiere un conjunto de datos relacional, constituido por documentos web, *tags*, usuarios e instancias de *tagging*. A su vez, los documentos web deben estar divididos en sus diferentes elementos HTML y estos deben estar atomizados por términos de los cuales también se requiere conocer si son sustantivos en el texto. La preparación de datos inicia con la descarga de los *datasets* de referencia, que están en texto plano y poseen las direcciones URL de los recursos web, pero no su contenido, el cual es recuperado por un *crawler* (desarrollado en C#.Net 2008), que de cada dirección web visitada, extrae el texto de cada elemento HTML, para almacenarlo en la base de datos.

Aprendizaje de pesos para componentes estructurales y función gramatical sustantivo: Sobre el conjunto de datos relacionales, que como parte de los casos de etiquetado conocidos almacena los términos clasificados por componente HTML junto a un campo que determina si son sustantivos, opera el algoritmo de minería de datos de regresión lineal descrito previamente, para aprender los pesos que mejor se ajusten a la probabilidad de que un término sea una etiqueta que el usuario potencialmente asignaría a un recurso. Los datos introducidos a la herramienta de minería de datos para el aprendizaje de pesos son los siguientes:

- a. Los valores de TF en los elementos HTML en que existe el término en una página.
- b. Un valor booleano que indica si el término es un sustantivo.
- c. Un atributo conocido que identifica si un término ha sido utilizado como etiqueta para anotar un documento web.

En cuanto el algoritmo de minería de datos proporciona los pesos de ponderación de las TF y de la función gramatical sustantivo, tales pesos se guardan en la base de datos para luego ser utilizados en la recomendación de etiquetas candidatas.

B. Fase de predicción o recomendación de etiquetas

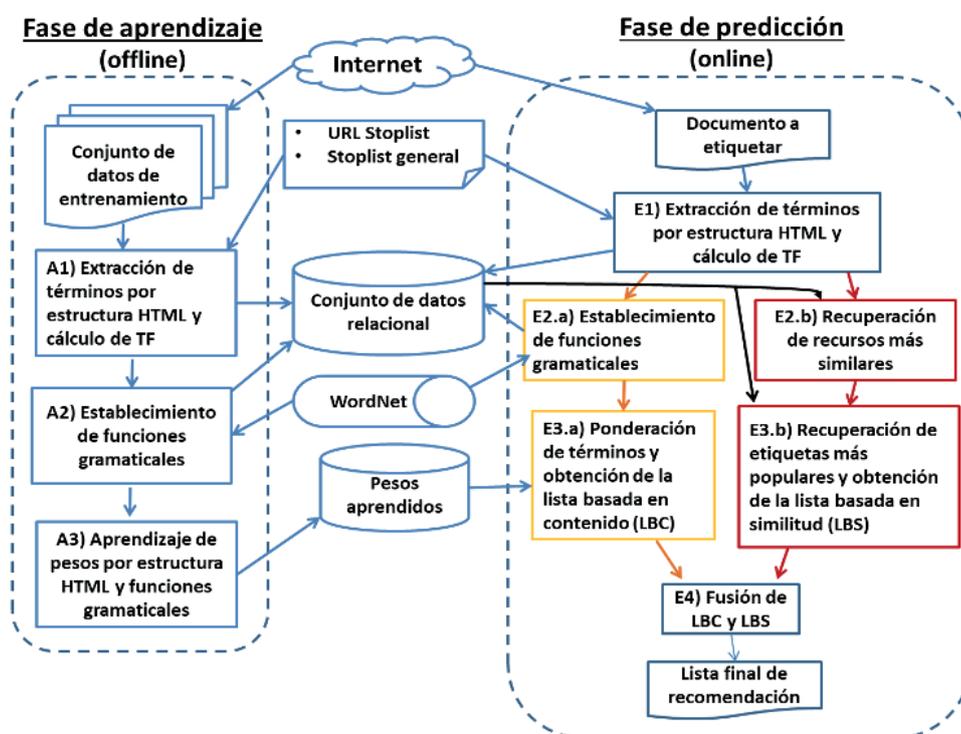
En esta fase el modelo recomienda un máximo de 10 etiquetas. La fase se efectúa cuando el usuario ha navegado hacia el recurso web que desea anotar y este se ha descargado desde Internet. Se extraen los términos de cada componente HTML (título, URL, *body*, *links*, metadatos *keywords* y metadatos *description*) y se calcula su TF respectiva.

Similar al paso A1 de la fase de aprendizaje, la extracción de términos y cálculo de los valores de TF, que comprende el paso E1, involucra el uso de dos *stoplists*. Para omitir términos irrelevantes de la URL, se utiliza la URL *stoplist*, mientras que para los demás componentes del HTML se establece la *stoplist* general. Ambas listas se describen más adelante.

Como resultado del proceso de extracción de términos, además de almacenarlos en la base de datos relacional, como historial de navegación del usuario, se obtienen dos representaciones del recurso a etiquetar:

- a. Una lista de términos con los sustantivos identificados y con un valor de TF por cada componente HTML.
- b. Una representación vectorial aplicando el VSM de Salton et al. (1975), que se utiliza como una consulta sobre la cual se recuperan los K recursos más similares en la peronomía del usuario. En los vectores se utilizan valores binarios para identificar los términos que existen en cada documento, así como en la consulta.

Figura 1. Funcionamiento general del modelo híbrido de recomendación



Lista Basada en Contenido (LBC): En cuanto los términos han sido clasificados por componente HTML, se inician en paralelo dos grupos de procesos. El primero, enumerado como E2.a y E3.a, obtiene una Lista Basada en Contenido (LBC). Esta lista preliminar de recomendación se consigue ponderando, mediante los pesos obtenidos en la fase de aprendizaje, los valores de TF y la función gramatical sustantivo de los términos. Los N términos más probables de ser etiquetas son incluidos en la LBC.

Lista Basada en Similitud (LBS): El segundo grupo de procesos (E2.b y E3.b), genera una lista de recomendación con las N etiquetas más populares en los K recursos más similares al recurso a etiquetar, en la personomía del usuario. Así se aprovecha el historial de etiquetas del usuario. Para el cálculo de similitud entre documentos se utiliza la métrica del coseno, con pesos binarios que adoptan el valor 1, si un término existe en un recurso, y cero en caso contrario.

Fusión de LBC y LBS: Mediante el proceso E4 se fusionan las listas LBC y LBS, en tres pasos (impulsión, remplazo y complementación), descritos a continuación: primero se impulsan en LBC los ítems que coexisten en LBS, para que ocupen los primeros lugares de LBC. En la tabla 1 se muestra el resultado de la impulsión de términos descrita.

En el segundo paso (remplazo), los 5 últimos ítems de LBC se remplazan por los primeros 5 ítems de LBS, que no coexistan en los primeros 5 ítems de LBC. A la derecha de la tabla 2 se muestra un ejemplo del remplazo de términos explicado.

Se optó por tomar los últimos 5 ítems de LBS, porque constituyen las etiquetas del historial del usuario, con las cuales el mismo ha anotado otros recursos similares al recurso a etiquetar. Se consideró que de esa forma habría equilibrio entre las etiquetas obtenidas del contenido del recurso y las etiquetas obtenidas del historial del usuario, logrando así una lista de recomendación híbrida.

Tabla 1. Primer paso: Impulsión

LBS	LBC	LBC (con términos impulsados)
Internet	Column	Resource
Video	Paper	Printer
Word	Woman	Column
Car	Mother	Paper
Dog	Resource	Woman
Resource	English	Mother
Facebook	Champion	English
Printer	Printer	Champion
Mouse		
Photo		

Tabla 2. Segundo paso: Reemplazo

LBS	LBC (con términos impulsados)	LBC (últimos términos reemplazados)
Internet	Resource	Resource
Video	Printer	Printer
Word	Column	Column
Car	Paper	Internet
Dog	Woman	Video
Resource	Mother	Word
Facebook	English	Car
Printer	Champion	Dog
Mouse		
Photo		

Si en este punto LBC no contiene 10 ítems, se efectúa el tercer paso (complementación), con el cual se adicionan a LBC más ítems de LBS, hasta que LBC contenga 10 ítems o hasta que en LBS no haya más ítems disponibles. Luego de este último paso, se obtiene la lista final de recomendación, ilustrada en la tabla 3, como LBC (complementada).

Tabla 3. Tercer paso: Complementación

LBS	LBC (complementada)
Internet	Resource
Video	Printer
Word	Column
Car	Internet
Dog	Video
Resource	Word
Facebook	Car
Printer	Dog
Mouse	Facebook
Photo	Mouse

C. Conjunto de datos relacional

La base de datos relacional, almacena el contenido del *dataset* de entrenamiento y el historial de etiquetado del usuario, y agiliza la búsqueda de palabras por componente HTML, y de documentos similares a un documento específico que va a ser etiquetado. La herramienta de minería de datos utilizada en el aprendizaje, se conecta con la base de datos para consultar los datos de entrenamiento. En concordancia con Levandoski et al. (2011), se considera que las funciones propias del motor de base de datos para las búsquedas de texto, pueden aprovecharse para acelerar las búsquedas de documentos.

D. La URL stoplist y la stoplist general

Se observa en la figura 1, que se utilizan dos *stoplists*. La URL *stoplist*, sirve para filtrar términos irrelevantes de la URL y la *stoplist* general, se emplea en el procesamiento de los demás elementos HTML y además es parte de la URL *stoplist*. La URL *stoplist* posee además otros términos que aparecen con mucha frecuencia en las direcciones web, como HTTP, PHP, WWW, INDEX, por lo cual se los considera *stopwords* en la URL de las páginas web, pero no en los demás elementos estructurales del HTML. La *stoplist* general utilizada es la provista por el motor de base de datos SQL Server 2008, en inglés.

6. Resultados

A. Línea base

En Portilla Olvera & Godoy (2012), se describen seis enfoques de pesado de términos para la recomendación de etiquetas basada en contenido. En tales enfoques se destacó como segundo mejor, el que genera recomendaciones ponderando los valores TF, elementos de la estructura HTML y los términos que cumplen la función gramatical sustantivo, con pesos aprendidos por regresión lineal. A fin de evaluar si la incorporación del historial de etiquetado del usuario en la lista de recomendación genera mejoras, se utilizó el referido enfoque basado en contenido de dos formas:

- a. Como componente basado en contenido al que se incorporan las recomendaciones basadas en el historial del usuario, formando así el modelo híbrido propuesto.
- b. Como línea base, de comparación o referencia para determinar si el modelo híbrido genera mejoras respecto al modelo de recomendación basado solo en contenido.

B. Métricas de evaluación

Para evaluar la línea base y el modelo propuesto, se utilizaron las métricas estándar de precisión, *recall* (cobertura) y *f-measure* (medida f mejor conocida como F1) (Baeza-Yates & Ribeiro-Neto, 1999). La precisión mide la cantidad de etiquetas recomendadas que fueron usadas por el usuario para anotar el recurso, *recall* mide el número de etiquetas relevantes recomendadas sobre el total que debieron recomendarse y F1 es una medida que balancea precisión y *recall*.

Dado que las recomendaciones se presentan en una lista ordenada o ranking, las métricas se analizan en distintos puntos del mismo. $P@k$ es el porcentaje de etiquetas relevantes entre las k primeras recomendaciones. $P@1$ por ejemplo, es la cantidad de veces que la primera etiqueta recomendada fue relevante. Otra métrica utilizada fue el éxito $S@k$, que es la probabilidad de encontrar una etiqueta relevante entre las k primeras recomendaciones, donde $S@1$ es equivalente a $P@1$ por definición.

En los experimentos, para cada usuario se utilizaron los recursos de su personomía. Para calcular las métricas se realizaron simulaciones de recomendaciones sobre la línea base y el modelo propuesto, recomendando un máximo de 10 etiquetas para cada recurso. Se decidió trabajar con máximo 10 ítems, tomando como referencia los trabajos relacionados expuestos en Ju & Hwang (2009); Yu-Ta, Shouu-I, Tsung-Chiej & Yung-jen (2009); Musto et al, (2009); y, Zhang, Zhang & Tang (2009), donde se experimenta con listas de recomendación de máximo 10 ítems.

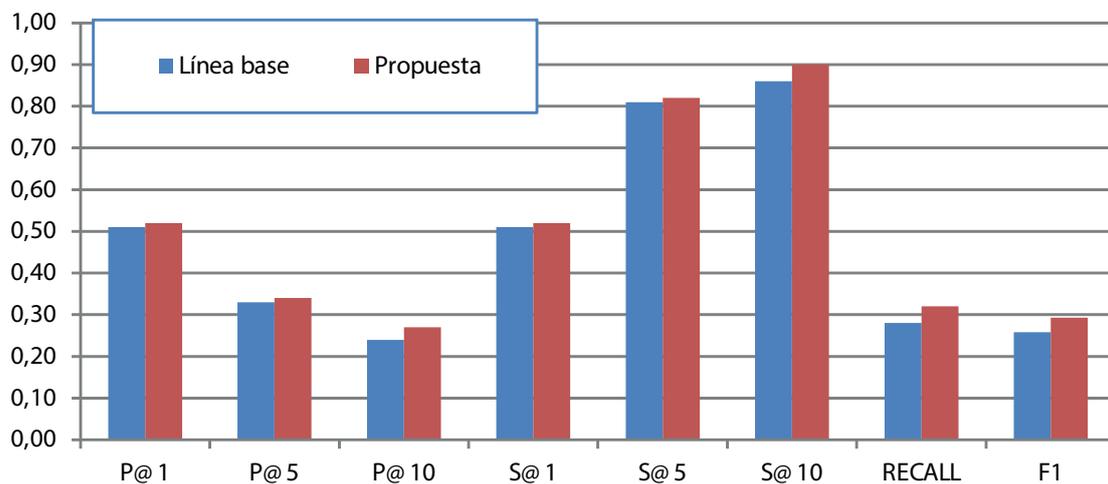
C. Resultados obtenidos

La figura 2 ilustra que, en general, el enfoque basado en contenido es ligeramente superado por el enfoque híbrido propuesto, en todas las métricas. Los mejores resultados del modelo híbrido propuesto respecto a la línea base, se pueden apreciar en la tabla 4, en las métricas P@10, Recall y consecuentemente en F1, en comparación con las demás métricas.

Tabla 4. Resumen de métricas de evaluación sobre la línea base y el modelo propuesto

Modelo	P@1	P@5	P@10	S@1	S@5	S@10	RECALL	F1
Línea base	0.51	0.33	0.24	0.51	0.81	0.86	0.28	0.258
Propuesta	0.52	0.34	0.27	0.52	0.82	0.90	0.32	0.293

Figura 2. Resumen de métricas de evaluación sobre la línea base y el modelo propuesto



En la figura 3 se muestran los resultados por separado para cada métrica, en 12 grupos que se construyeron según la cantidad de etiquetas de cada personomía, de forma que los usuarios del grupo 1 poseen menores cantidades de etiquetas que los usuarios del grupo 2. La figura 3 (a), ilustra que en la P@1, el modelo propuesto mejora a la línea base en 9 de los 12 grupos. En los grupos 6, 8 y 9 resultó mejor la línea base. En cuanto a la P@5, ilustrada en la figura 3 (b), el modelo propuesto mejoró a la referencia en todos los casos, aunque por un margen de diferencia muy pequeño. La figura 3 (c) muestra que en la P@10, la línea base resultó mejor que el modelo propuesto en el grupo 8. En los otros 11 grupos, el modelo híbrido propuesto mejoró a la referencia.

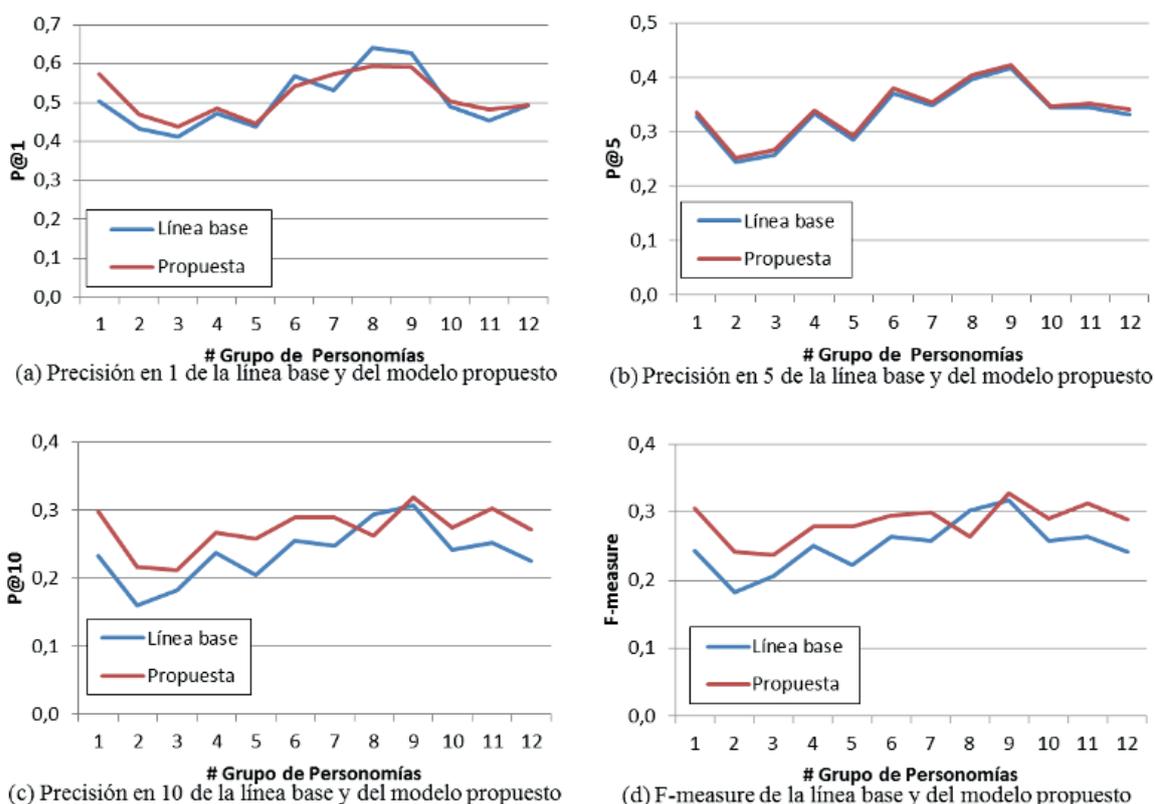
7. Discusión

Según lo ilustrado en la figura 3(a) y figura 3(b), al recomendar listas de 1 ítem y 5 ítems respectivamente, las diferencias entre la línea base y la propuesta son mínimas, mientras que la figura 3(c) y la figura 3(d) muestran que al recomendar listas de 10 ítems las diferencias entre la línea

base y el modelo propuesto se amplían, resultando mejor el modelo propuesto. Esto podría ser un indicador de que el mejor rendimiento del modelo propuesto se logra al recomendar listas de 10 ítems. Los resultados del modelo propuesto mejoran levemente a los resultados de la referencia. Este comportamiento concuerda con lo expuesto por Ju y Hwang (2009), quienes observan que la fuente de información que mayor calidad aporta a la lista de recomendación final es el contenido del recurso a anotar.

Hay que destacar que las recomendaciones del modelo híbrido incluyen etiquetas que no existen en el contenido del recurso a anotar ni en ningún diccionario digital, debido a que generalmente son escritas por el usuario y tienen un significado comprensible solo por él. Por tal razón, un modelo basado en contenido jamás recomendaría estas etiquetas, mientras que un modelo híbrido que incluya el historial del usuario si lo haría, en casos de que el usuario requiera anotar otros recursos con las mismas etiquetas, evitándole volver a escribirlas y con ello logrando que el usuario perciba al sistema de recomendación amigable y cómodo.

Figura 3. Gráficos individuales de las métricas sobre la línea base y el modelo propuesto



8. Conclusiones y trabajos futuros

Los resultados de los experimentos sustentan que al fusionar la lista de recomendación basada en contenido, con las etiquetas más populares por personomía mediante el sencillo enfoque de impulsión, remplazo y complementación, el modelo propuesto aporta al enfoque planteado en Portilla Olvera & Godoy (2012), pequeñas mejoras en todas las métricas evaluadas.

Si bien los resultados del modelo propuesto no distan significativamente de los resultados de la línea base, sí constituyen mejoras. Considerando que el modelo híbrido propuesto permite reutilizar etiquetas escritas manualmente por el usuario, evitándole volver a escribirlas al etiquetar otros recursos, lo cual resulta en mayor comodidad para el usuario, tales mejoras justifican plenamente la implementación del modelo híbrido en sistemas de recomendación de etiquetas.

Un posible trabajo futuro podría ser experimentar con modelos que adicione otros pasos, además de los indicados como impulsión, remplazo y complementación, o varíen el orden de los mismos en busca de mejores resultados en las listas de recomendación.

Otro trabajo futuro sería la incorporación de recomendaciones colaborativas, que aprovechen, además de las etiquetas del historial del usuario actual y del contenido de los recursos, las etiquetas asignadas por otros usuarios, ya sea al mismo recurso o a recursos similares. Esto permitiría agregar heterogeneidad a la lista de recomendaciones y utilizar en el etiquetado el lenguaje predominante de la comunidad.

Finalmente, otro trabajo futuro sería un modelo de recomendación multilingüaje, que se pueda utilizar en múltiples idiomas, no sólo en inglés.

Referencias

- Albarran, G. & Eduard, G. (2009). *Data Mining and SQL*. Lima, Perú: Megabyte
- Baeza-Yates, R. & Ribeiro-Neto, B. (1999). *Modern Information Retrieval*. Boston, Massachusetts, USA: Addison-Wesley
- Belem, F. M.; Almeida, J. M. & Goncalves, M. A. (2017). A Survey on Tag Recommendation Methods. *J. Assoc. Inf. Sci. Technol* 68(4), 830-844. doi: 10.1002/asi.23736.
- Godoy, D. & Amandi, A. Hybrid (2008). Content and Tag-based Profiles for Recommendation in Collaborative Tagging Systems (pp. 58-65). *Proceedings of the 2008 Latin American Web Conference*. Espírito Santo, Brasil.
- Godoy, D. & Corbellini, A. (2016). A State-of-the-art Review. *International Journal of Intelligent Systems* 31(4), 314-346. doi: 10.1002/int.21753
- Gou, Z.; Han, L.; Zhu, J.; Yang, Y. & Duan, B. (2018). Personalized Search by a Multi-Type and Multi-Level User Profile in Folksonomy. *Arab. J. Sci. Eng* 43(12), 7563-7572. doi: 10.1007/s13369-018-3133-2
- Hong, L.; Chi, E. H.; Budiu, R.; Pirolli, P. & Nelson, L. (2008). SparTag.us: A Low Cost Tagging System for Foraging of Web Content. *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, 65-72. Napoli, Italy.
- Hotho, A.; Jäschke, R.; Schmitz, C. & Stumme, G. (2006). Information Retrieval in Folksonomies: Search and Ranking. *European Semantic Web Conference*, 411-426. Budva, Montenegro: Springer.
- Ju, S., & Hwang, K.-B. (2009). A weighting scheme for tag recommendation in social bookmarking systems. *Proceedings of the 2009th International Conference on ECML PKDD Discovery Challenge - Volume 497*, 109-118. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/3056147.3056156>
- Levandovski, J. J.; Ekstrand, M. D.; Ludwig, M. J. et al. (2011). *Benchmarks for Evaluating Performance of Recommender System Architectures*. *PVLDB* 4, 911-920. doi: 10.14778/3402707.3402729.
- Lipczak, M. (2008). Tag Recommendation for Folksonomies Oriented towards Individual Users. *Proceedings of ECML PKDD*, 84-95. Amberes, Bélgica.
- Liu, H. (2018). A Tag-Based Recommender System Framework for Social Bookmarking Websites. *Inderscience Publishers* 14(3): 303-322. doi: 10.1504/IJWBC.2018.094916
- Lo, R. T.; He, B. & Ounis, I. (2005). Automatically Building a Stopword List for an Information Retrieval System. *5th Dutch-Belgium Information Retrieval Workshop (DIR) '05*, 1-8. Países Bajos. <https://bit.ly/2Fbz8v5>

- Mishne, G. (2006). AutoTag: A Collaborative Approach to Automated Tag Assignment for Weblog Posts. *Proceedings of the 15th International Conference on World Wide Web*, 953-954. Edimburgo, Escocia: ACM.
- Musto, C.; Narducci, F.; Gemmis, M. d.; Lops, P., & Semeraro, G. (2009). STaR: A Social Tag Recommender System. *Proceedings of the ECML/PKDD Discovery Challenge*, 215-227. Bled, Eslovenia.
- Peng, J. & Zeng, D. (2010). Making Item Predictions through Tag Recommendations. En: *ICEBI2010*, 483-490. Kunming, Yunnan, P. R.China: Atlantis Press.
- Porter, M. (1980). An Algorithm for Suffix Stripping. *Program: electronic library and information systems* 14(3): 130-137. doi: 10.1108/eb046814
- Portilla Olvera, E. & Godoy, D. (2012). Evaluating Term Weighting Schemes for Content-based Tag Recommendation in *Social Tagging Systems*. *IEEE Latin America Transactions* 10(4): 1973-1980. doi: 10.1109/TLA.2012.6272482
- Qassimi, S. & Abdelwahed, E. (2019). The Role Of Collaborative Tagging and Ontologies in Emerging Semantic of Web Resources. *Computing* 101(10): 1489-1511. doi: 10.1007/s00607-019-00704-9
- Salton, G., Wong, A. & Yang, C. (1975). A Vector Space Model for Automatic Indexing. *Comun. ACM* 18(11): 613-620. doi: 10.1145/361219.361220.
- Singh, A. K., Nagwani, N. K., & Pandey, S. (2017). TAGme: A Topical Folksonomy Based Collaborative Filtering for Tag Recommendation in Community Sites. *Proceedings of the 4th Multidisciplinary International Social Networks Conference*, 1-7. <https://doi.org/10.1145/3092090.3092095>
- Sood, S., Owsley, S., Hammond, K. & Birnbaum, L. (2007). Tagassist: Automatic Tag Suggestion for Blog Posts (pp.1-7). *International Conference on Weblogs and Social Media*, USA: Boulder, Colorado.
- Veerman, E.; Lachev, T. & Sarka, D. (2009). *Microsoft SQL Server 2008 - Business Intelligence Development and Maintenance*. Washington, EEUU: Microsoft Press.
- Wang, K.; Jin, Y.; Wang, H.; Peng, H. & Wang, X. (2018). Personalized Time-aware Tag Recommendation. *Proceedings of the 32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence*, (pp. 459-466). New Orleans, LA, USA.
- Wetzker, R.; Zimmermann, C. & Bauckhage, C. (2008). Analyzing Social Bookmarking Systems: A del.icio.us Cookbook (pp. 26-30). *Proceedings of the ECAI 2008 Mining Social Data Workshop*. Patras, Grecia.
- Wu, Y.; Yao, Y.; Xu, F.; Tong, H. & Lu, J. (2016). Tag2Word: Using tags to generate words for content based tag recommendation. *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Information and Knowledge Management*, 2287-2292. Indianapolis, USA: ACM.
- Yu-Ta, L.; Shou-I, Y.; Tsung-Chieh, C. & Jane Yung-jen, H. (2009). A Content-Based Method to Enhance Tag Recommendation. *Proceedings of the 21st international joint conference on Artificial Intelligence*, 2064 - 2069. Pasadena, California: Morgan Kaufmann.
- Zhang, N.; Zhang, Y. & Tang, J. (2009). A Tag Recommendation System for Folksonomy. *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Social Web Search and Mining*, 9-16. Hong Kong, China: ACM.
- Zhang, Z.-K.; Tao, Z. & Yi-Cheng, Z. (2011). Tag-aware Recommender Systems: A State-of-the-art Survey. *J. Comput. Sci. Technol* 26(5): 767-777. doi: 10.1007/s11390-011-0176-1

Desarrollo y evaluación de un gateway móvil IoT para redes 4G LTE

Developing and evaluation of an IoT mobile gateway for 4G LTE networks

Manuel Quiñones-Cuenca¹, Hever Patricio Pachar Bravo², Javier Martínez-Curipoma³, Luis Quiñones⁴, Rommel Torres⁵

Resumen

La tendencia actual es interconectar cualquier dispositivo para ser monitoreado y controlado de manera remota por medio de tecnologías propias del concepto de IoT. Uno de los problemas es conectar los dispositivos a una red mediante tecnologías con suficiente cobertura y capacidad, por lo que en el presente artículo se muestra el desarrollo de un gateway móvil para aplicaciones IoT bajo la plataforma Android, evaluado en redes móviles de 4G. El gateway móvil IoT envía los datos recolectados de sensores mediante la selección de los protocolos MQTT y HTTP, hacia plataformas IoT en Internet. La arquitectura se compone de sensores de temperatura, luminosidad y presión que se integran en un nodo sensor, cuya función es la obtención de los datos, procesamiento y luego, mediante Bluetooth, se envía a un smartphone Android, donde se ejecuta una aplicación que hace la función gateway móvil. Aquí se realiza el entramado de datos que son enviados mediante la red 4G LTE hacia las plataformas IoT de Ubidots y Watson IoT. Posteriormente se realizaron pruebas con varias métricas como latencia, demanda de corriente y costos de conexión. Se concluye que el gateway móvil IoT tiene un mejor rendimiento bajo el protocolo MQTT, en comparación con HTTP.

Palabras clave

Internet de las Cosas, MQTT, HTTP, Ubidots, Watson IoT, WSN, LTE

Abstract

The current trend is to connect everything to network to be monitored and controlled remotely through own concept IoT technologies. One of the problems is to connect the devices to a network, using technologies with sufficient coverage and capacity, so this article shows the development of a mobile gateway for IoT applications under the Android platform evaluated in 4G mobile networks. The IoT mobile gateway sends the data collected from sensors by selecting the MQTT and HTTP protocols, to IoT platforms on the Internet. The architecture is composed of temperature, luminosity and pressure sensors that are integrated into a sensor node which function is for data collection, processing and then via Bluetooth is sent to an Android smartphone where an application that performs the mobile gateway function is running, here data network are sent through the 4G LTE network to the IoT platforms of Ubidots and Watson IoT. Subsequently, tests were carried out with various metrics such as latency, energy consumption and connection costs. It concludes that IoT mobile gateway has better performance under MQTT protocol compared to HTTP.

Keywords

Internet of things, MQTT, HTTP, Ubidots, Watson IoT, WSN, LTE

1. Introducción

Actualmente, IoT (Internet of Things) o Internet de las Cosas, es un concepto que tiene por objetivo conectar todo o casi todo a Internet, para ser controlados, monitoreados o para tele-

1 Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), Ecuador. [mfquiones@utpl.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-2932-1524>]
2 Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), Ecuador. [hppachar@utpl.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-7124-2232>]
3 Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), Ecuador. [jfmartinez1@utpl.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-6981-3323>]
4 Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), Ecuador. [lquinones@utpl.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-5894-9882>]
5 Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), Ecuador. [rovitor@utpl.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-2313-0118>]

metría (Cabrera-Goyes & Ordoñez-Camacho, 2018; Rodríguez et al., 2019). IoT es el resultado de años de evolución de Internet, donde el número de dispositivos conectados a Internet, según Zimmermann & Empspak (2017), eran 20 000 dispositivos en el año 1987, y en la actualidad existen más dispositivos conectados a Internet que personas en el planeta. La interacción entre dispositivos aumenta cada día. De acuerdo a Cisco (2016), en un futuro serán 500 mil millones de dispositivos conectados para el 2030.

Para la transmisión de datos en IoT, se puede aplicar una diversidad de protocolos y tecnologías de comunicación alámbricas e inalámbricas. Algunas de las tecnologías inalámbricas, como Zigbee, Bluetooth, Digimesh e incluso Wi-Fi, requieren que los dispositivos o nodos se emparejen con un controlador o un *gateway*, con IP habilitado para obtener acceso indirecto a Internet, mediante otras tecnologías de comunicación como las redes móviles o de servicio móvil avanzado (SMA) de 2G, 3G, y 4G. De estas, actualmente las redes móviles basadas en 4G usando LTE son las que, a nivel global, regional y en el Ecuador, más suscripciones tienen (Arcotel, 2017). Por esto la importancia de estudiar más a fondo el rendimiento de la red 4G en aplicaciones IoT.

Según Open Signal (2018), la disponibilidad de redes 4G en Latinoamérica varía entre el 80 % como máximo, en Uruguay; 43 % para el mínimo en El Salvador y 45% para Ecuador. La velocidad de acceso máxima la tiene Ecuador con un promedio de velocidad 23.3 Mbps, y en todos los países analizados se sobrepasa la barrera de los 10 Mbps. Por lo tanto, estas redes brindan un acceso adecuado para conectar dispositivos IoT, ya que actualmente están en expansión de cobertura y altas tasas de velocidad, a diferencia de las tecnologías inalámbricas para IoT basadas en Wi-Fi y Bluetooth, que tienen un menor alcance y cobertura (Majdi, 2013).

En el año 2014 la tecnología 4G LTE fue introducida a Ecuador por la estatal CNT EP (Arcotel, 2017), a diferencia de Brasil, Colombia y Uruguay, que han venido trabajando desde el año 2012. En estos países algunos trabajos relacionados plantean el uso de la red 4G LTE como un *gateway* para escenarios de IoT. Asimismo, Díaz-Zayas et al. (2016), proponen un análisis a la estandarización planteada por el 3GPP de añadir el soporte aplicaciones IoT bajo LTE. En este trabajo se explica la evolución de LTE para soportar IoT, lo que ha llevado a un aumento de la vida útil de la batería de los dispositivos IoT en el orden de años, reducida complejidad, mayor cobertura y alta densidad de nodos. Con respecto a los protocolos planteados HTTP y MQTT, en Sthepen (2012) se establece que HTTP consume más energía por hora, que MQTT, y los mensajes enviados usando MQTT son en promedio diez veces más que con HTTP; concluye que MQTT es más liviano al reducir el consumo de energía y más rápido. En Yokotani & Sasaki (2016) se establece con respecto al ancho de banda y consumo de recursos, que MQTT tiene un rendimiento superior que HTTP.

En este trabajo se plantea el diseño e implementación de un sistema donde se integra una aplicación en la plataforma Android, que permite establecer una puerta de enlace móvil (*gateway* móvil), entre una red de sensores inalámbrica (WSN) basada en Bluetooth y una red móvil 4G, mediante la selección de un protocolo de capa de aplicación (HTTP o MQTT) para la transmisión de los datos. La importancia del desarrollo del sistema radica en que compara la latencia, consumo de energía y costes de conexión, entre los protocolos HTTP y MQTT, cuando interactúan con plataformas de IoT. El sistema además ofrece un modelo escalable y funcional, con la capacidad de agregar nuevos nodos de sensores u otras tecnologías.

Este documento está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2, Metodología, se plantea la arquitectura del sistema, requerimientos de hardware, protocolos de IoT y plataformas de IoT utilizadas. En la sección 3, se muestra la implementación de un prototipo de

una WSN y un *gateway* móvil, con la transmisión de datos a una plataforma IoT, usando HTTP y MQTT, y el análisis de los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 4 se presenta las conclusiones y recomendaciones.

2.2. Metodología

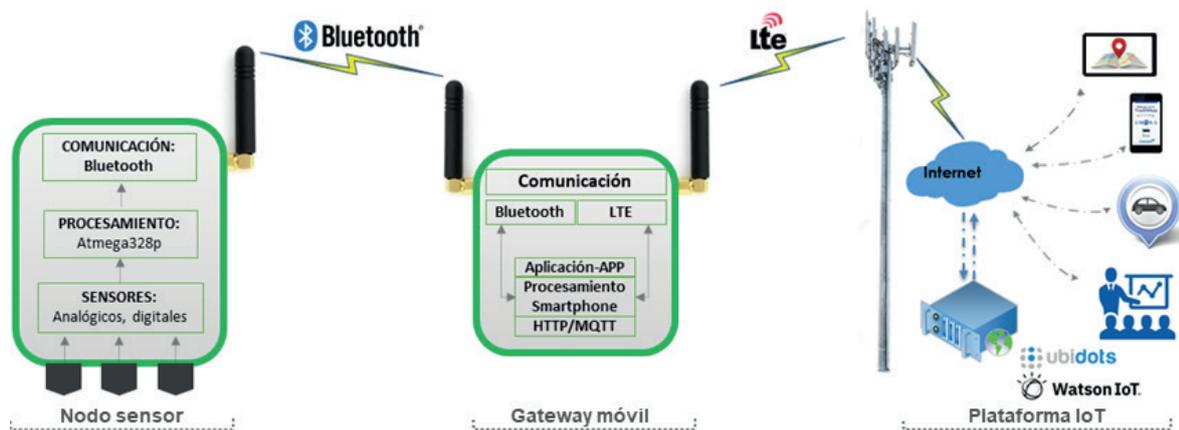
A través de un diseño experimental y un enfoque cuantitativo, se procede a realizar las siguientes fases de desarrollo e implementación del sistema:

1. Revisión del estado del arte de tecnologías disponibles para las WSN e Internet de las cosas IoT.
2. Diseño e implementación de la arquitectura de la red WSN que permite obtener los datos a ser transmitidos por la red 4G.
3. Desarrollo de la aplicación mediante Android Studio, y se realizan pruebas para validar el rendimiento de los dos tipos de protocolos a implementar (HTTP y MQTT) para el envío de los datos a plataformas IoT.
4. Análisis de los resultados de rendimiento con las métricas de consumo de energía, latencia y costos de conexión, para establecer el protocolo que tiene mejores resultados sobre redes 4G.

2.1. Arquitectura del sistema

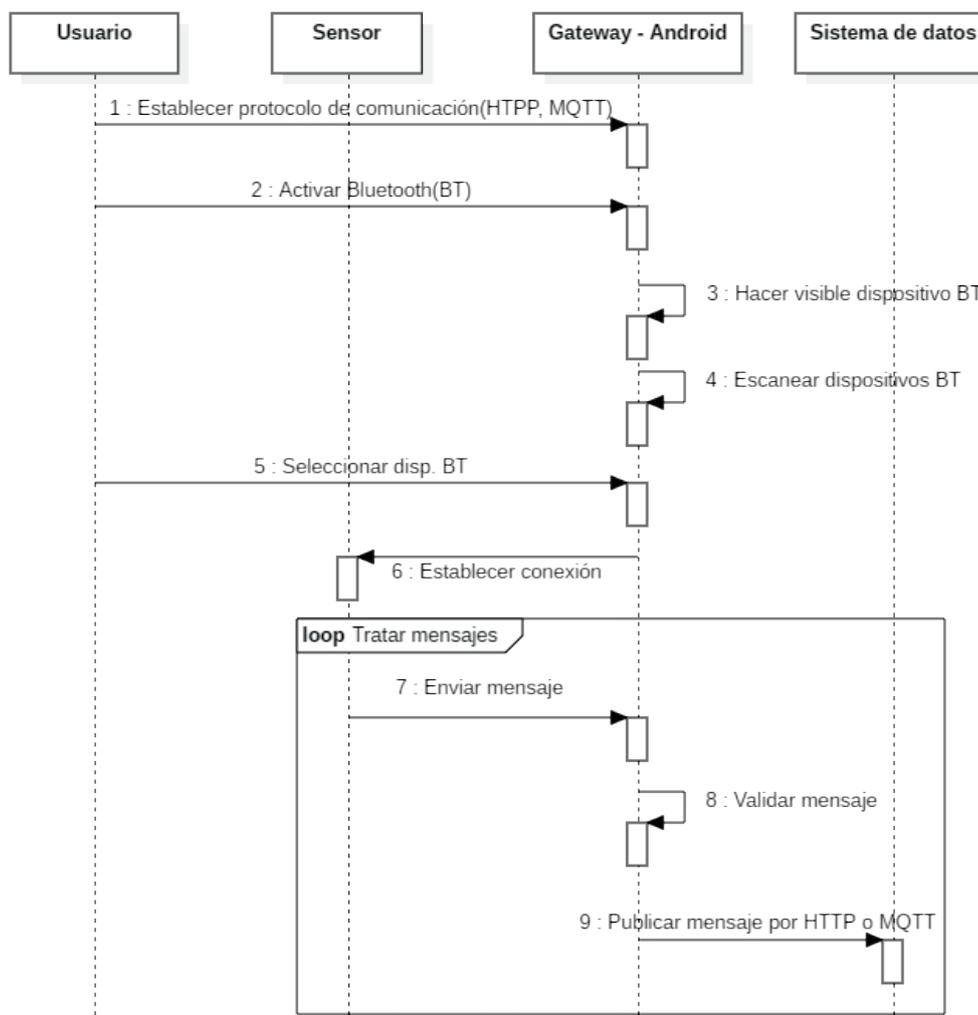
El sistema está integrado de elementos de hardware y software. En la figura 1 se detallan los tres componentes del sistema: Nodo sensor, *gateway* móvil y las plataformas de IoT.

Figura 1. Arquitectura del sistema



El sistema incorpora una red de sensores para obtener los datos de prueba de variables como temperatura, humedad y luminosidad; estos datos se envían por medio de Bluetooth a un *smartphone* que realiza las funciones de un *gateway* móvil. Para la implementación de este se desarrolla una aplicación en Android, donde se procesa las tramas recibidas desde la WSN y se visualiza los datos de cada variable. Luego esta aplicación envía los datos a dos plataformas de IoT mediante la selección de uno de los protocolos HTTP o MQTT. En la figura 2, mediante un diagrama de secuencias, se detalla la interacción de los distintos componentes del sistema.

Figura 2. Diagrama de secuencias: interacción entre los componentes del sistema



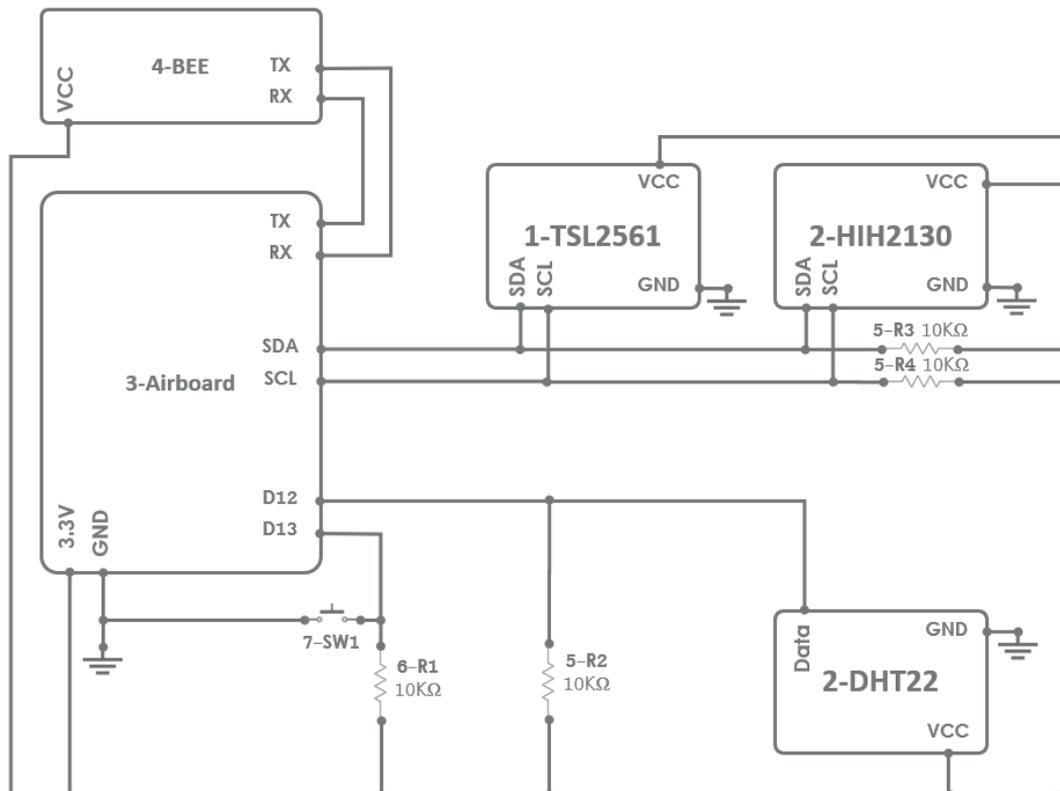
2.1.1. HARDWARE

En esta subsección se presenta los requerimientos de hardware para operar la aplicación del *gateway* móvil en el *smartphone*, y los componentes electrónicos utilizados para desarrollar el hardware del sistema embebido (nodo sensor). Para la operación del aplicativo móvil del *gateway* es necesario un *smartphone* que soporte el sistema operativo Android en la versión 4.4.4 o superior; con al menos las siguientes características 1 GB mínimo de RAM, conexión a datos móviles mediante LTE y procesador Quad-Core de 1.3 GHz. El nodo sensor está compuesto de los siguientes componentes electrónicos: 1) sensor de luminosidad (TSL2561), 2) sensores de temperatura y humedad relativa (DHT22 y HIH-6130), 3) plataforma de procesamiento para el nodo sensor (Airboard); y 4) módulo de comunicación Bluetooth (SainSmart Bee).

En la figura 3 se detalla el esquema de la arquitectura del hardware del nodo sensor, donde: el Airboard incorpora un microcontrolador que se usa para procesar la información obtenida por los sensores de luminosidad, temperatura y humedad relativa, y enviar la información por medio de tramas al módulo Bluetooth. El módulo Bluetooth es responsable de enviar la infor-

mación al *gateway* móvil; y el pulsador (SW1) permite iniciar la transmisión de las tramas. Los sensores integrados en el sistema son digitales y usan protocolos de comunicación como I2C y Single-bus Signal; y para la adecuada transmisión de los datos de los sensores al Airboard se requiere de resistencias de 10 k Ω en modo *pull-up* en la línea de transmisión de datos de acuerdo con cada protocolo de comunicación.

Figura 3. Esquema del nodo sensor



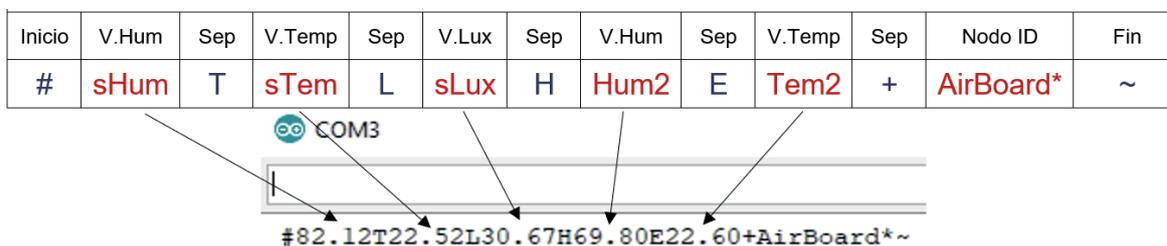
2.2. Software

En esta sección se detalla el funcionamiento y las herramientas utilizadas para el desarrollo del software para el aplicativo móvil y del nodo sensor.

2.2.1. ALGORITMO DEL NODO SENSOR

El algoritmo para el nodo sensor tiene las funciones de procesar y gestionar la información obtenida mediante los sensores, y estructurar las tramas, para su posterior envío al *gateway* móvil por medio del módulo Bluetooth. El algoritmo se desarrolla en el lenguaje de programación C para Arduino o mediante el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino. Este permite procesar y armar las tramas con los datos obtenidos de los sensores y enviarlas cada 30 segundos por el módulo Bluetooth hacia el *gateway* móvil. Las tramas son de tipo *string* y tienen el formato que se detalla en la figura 4.

Figura 4. Formato de trama enviada desde el nodo sensor al *gateway* móvil

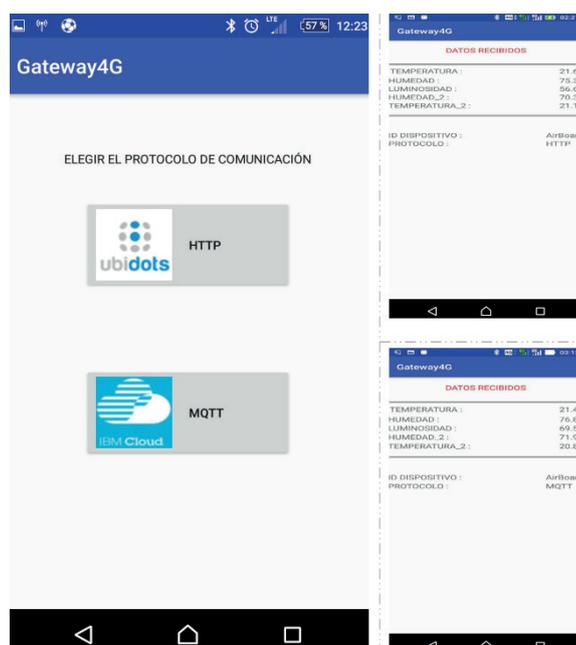


VHum: variable de humedad
VTemp: variable de temperatura
VLux: variable de luminosidad
Sep: separador

2.2.2. APLICACIÓN GATEWAY MÓVIL

La aplicación de la plataforma móvil es responsable de presentar la información de los sensores, permitir la selección del protocolo de IoT (HTTP o MQTT), gestionar la comunicación mediante Bluetooth con el nodo sensor, procesar las tramas recibidas desde el sistema embebido y transmitir la información mediante una red 4G LTE a la plataforma de IoT en base al protocolo seleccionado. Para el desarrollo de la aplicación móvil se utiliza el lenguaje de programación Java en el entorno de programación IDE de Android Studio. En la figura 5 se presenta la pantalla principal que permite seleccionar el protocolo de IoT. Para enviar la información a cada plataforma se usaron librerías de Ubidots para Android Studio (Ubidots, n.d.) y para la plataforma Watson IoT la librería de Eclipse PAHO MQTT v3 (Paho, n.d.).

Figura 5. Pantallas de la aplicación del *gateway* móvil para la selección protocolo de IoT



1.3. Protocolos de IoT usados

Actualmente, existe una variedad de protocolos de aplicación para IoT como MQTT (Message Queue Telemetry Transport), AMQP (Advanced Message Queuing Protocol), CoAP (Constrained Application Protocol) y HTTP (HiperText Transfer Protocol) (Naik, 2017). En el sistema se evalúan los protocolos HTTP y MQTT; asimismo, se usan plataformas de IoT que empleen estos protocolos y presenten facilidades como acceso libre o temporal para el despliegue de las pruebas. A partir de estas características se determina las siguientes plataformas: Ubidots por medio de HTTP (Ubidots, 2019) y Watson IoT con MQTT (IBM, 2019).

1.3.1. HTTP

HTTP usa en el intercambio de páginas web y servidores mediante mensajes de petición/respuesta. También se aplica para otros fines, como en este caso para aplicaciones IoT. Usa mensajes compuestos de cabeceras que intercambian información entre cliente y servidor, estos mensajes de petición son: *get*, *put*, *post*, *delete* y *trace* (Kurose & Ross, 2017).

1.3.2. MQTT

MQTT es un protocolo para el intercambio de mensajes de suscripción y publicación, optimizado para aplicaciones que requieren el intercambio de mensajes de pequeña longitud. MQTT se adapta muy bien a los requerimientos de IoT, dado que los recursos de procesamiento, memoria y ancho de banda son limitados. Usa TCP como protocolo de transporte. Es utilizado en sensores con enlaces satelitales, conexiones telefónicas ocasionales para servicios de salud y en domótica con pequeños dispositivos. Este protocolo es óptimo para trabajar con aplicaciones móviles debido a sus prestaciones de bajo consumo de energía y transmisión de datos liviana (Hillar, 2017)

La arquitectura de MQTT permite tener una gran flexibilidad debido a su modelo de publicar y suscribir, donde el cliente es el suscriptor o el publicador. Estas actividades se realizan de manera asíncrona, las mismas que son dirigidas mediante mensajes a un nodo central llamado Broker, que hace de intermediario entre los publicadores y los suscriptores (Manandhar, 2017). Según lo indica IBM (2010), los mensajes que se intercambian en este protocolo son *connect*, *publish*, *subscribe*, *unsubscribe* y *disconnect*. En este sistema el *gateway* móvil hace la función de publicador y la plataforma Watson IoT de cliente.

3. Resultados y discusión

Esta sección presenta los resultados que se obtuvieron para determinar el rendimiento de los protocolos HTTP y MQTT implementados en el *gateway* móvil mediante la realización de los experimentos de demanda de corriente, latencia, y consumo de datos móviles. Por cada protocolo se realiza pruebas con una hora de duración para 5, 10, 15 y 20 solicitudes, donde cada solicitud se publica una variable. En la figura 6 se muestra la integración e implementación de los distintos componentes de hardware y software para el despliegue del sistema, descritos en la sección 2.1: el nodo sensor, el dispositivo móvil que hace la función de *gateway* móvil, y en el computador los datos que son registrados en una de las plataformas de IoT. En las siguientes subsecciones se realiza el análisis de los resultados.

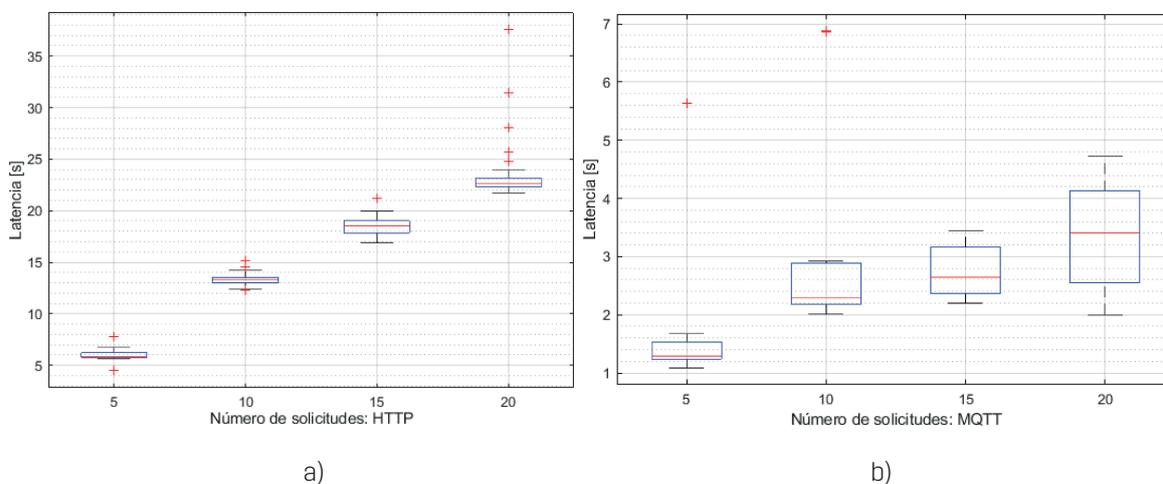
Figura 6. Implementación del sistema: nodo sensor, *gateway* móvil, y visualización del registro de datos en la plataforma Ubidots



3.1. Latencia

En las pruebas se usa un escenario para analizar el tiempo necesario para enviar 5, 10, 15 y 20 solicitudes cada 30 s, obteniendo 30 valores por cada prueba y por cada protocolo IoT, teniendo un conjunto 240 datos. Se entiende por latencia al tiempo transcurrido entre la primera solicitud y la recepción del último acuse de recibo de la última solicitud, es decir se ha despachado por completo estas transacciones. Para la captura de los paquetes se utilizó un *sniffer*, que genera un archivo tipo *pcap*, que contiene los datos del tráfico capturado y es analizado mediante Wireshark. Para el protocolo HTTP se usa el tiempo de transmisión desde la solicitud POST con el token de una cuenta en Ubidots hasta la última respuesta del servidor. Estos tiempos se pueden observar en el diagrama de caja de la figura 7.

Figura 7. Diagrama de cajas del tiempo de solicitud: a) HTTP y b) MQTT



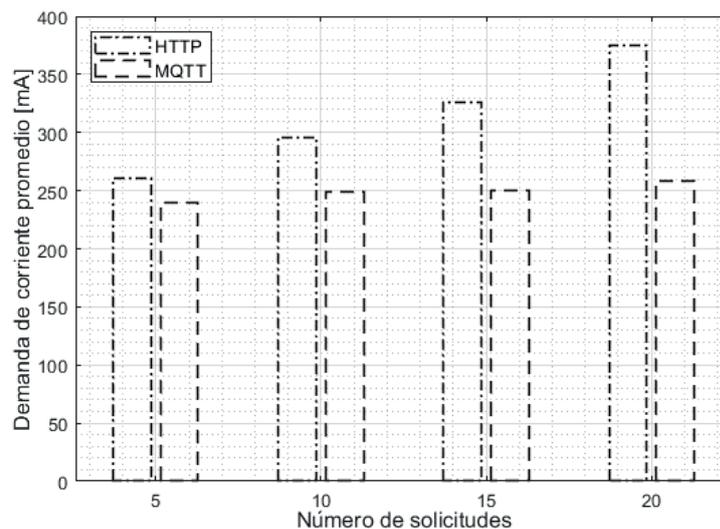
Se realiza una prueba Anova para determinar si la media de la latencia varía con respecto al número de solicitudes, con un nivel de significancia de 0.05, es decir un 95 % de confiabilidad. La hipótesis nula H_0 plantea que las medias de la latencia son significativamente distintas, con distinto número de solicitudes, mientras que la hipótesis no nula H_1 se afirma que, son significativamente iguales, esto se realiza con las muestras de los dos protocolos. Con los datos recolectados con el protocolo HTTP, usando la prueba de Fisher se obtuvo $F = 358.7592$ y un valor crítico $Z_c = 3.138$. Dado de $F > Z_c$ se rechaza la hipótesis H_0 , en consecuencia, se acepta la hipótesis nula H_1 , que establece que las medias de las distintas mediciones son significativamente distintas, con el protocolo HTTP.

Usando los datos para el protocolo MQTT, se obtiene $F = 67.1582$, y un valor crítico $Z_c = 3.162$, dado de $F > Z_c$, se concluye que las medias de las observaciones son significativamente distintas, pero en menor medida que en el protocolo HTTP. Finalmente, en HTTP se tiene la mayor cantidad de datos fuera de caja, según se muestra en la figura 7a, al crecer el número de solicitudes que permite prever una cierta inestabilidad en la red 4G, mientras que con MQTT se da en menor cantidad.

3.2. Demanda de corriente

Para analizar el consumo de corriente se ha usado la metodología planteada por Santos et al. (2016), donde se analiza el consumo de un *gateway* IoT en diferentes escenarios de consumo. Para obtener la información de la demanda de corriente se usa la aplicación Trepn Profiler (Qualcomm Technologies, 2019), que permite obtener datos del consumo eléctrico de la batería, carga de la CPU, frecuencia de la CPU, estado de la red móvil, entre otros datos. Las pruebas se realizaron en un *smartphone* Sony Xperia Z3 con un procesador Qualcomm MSM8974AC Snapdragon 801 con una conexión 4G LTE y una batería de Li-Ion de 3100 mAh. A partir de los datos obtenidos se determina que el tiempo de duración de la batería con MQTT oscila entre 12 a 13 horas, para 20 y 5 solicitudes respectivamente, mientras con HTTP el tiempo es de 8 (20 solicitudes) a 12 horas (5 solicitudes). El consumo de corriente promedio en las distintas observaciones y protocolos se establece en la Figura 8.

Figura 8. Media de la demanda de corriente en la batería en mA

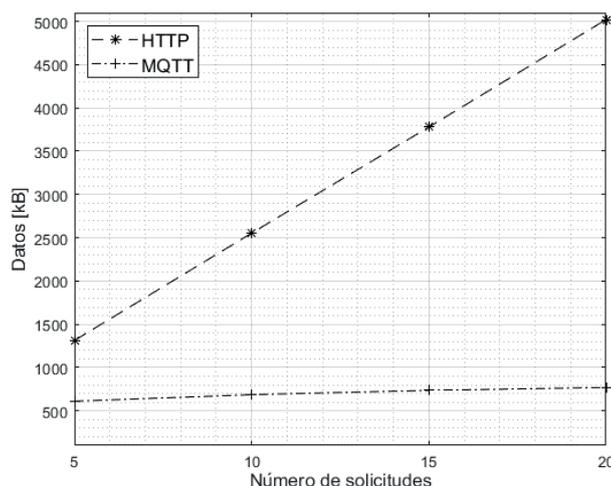


3.3. Consumo de datos móviles

Para determinar el consumo de datos móviles es necesario adquirir datos del tráfico que genera la aplicación; para este propósito se usa la herramienta App Tune-up Kit de Qualcomm (Qualcomm Technologies, n.d.), para analizar el rendimiento de los protocolos IoT mediante la variación del número de solicitudes enviadas cada 30 segundos, durante 60 minutos. Para el análisis del consumo de datos móviles se fija como referencia una tarifa de \$ 0.10/MB (Arcotel, 2018). De los datos recolectados se establece que el protocolo HTTP genera un tráfico con una desviación estándar de 1594.1 kB y un promedio de 3166.5 kB, y se establece una relación lineal, entre el tráfico y número de solicitudes.

En cambio, con el protocolo MQTT se genera tráfico con una desviación estándar de 69.3 kB y un promedio de 701.2 kB. A partir de este resultado se determina que el tráfico no varía al incrementar el número de solicitudes. De lo anterior se establece que HTTP genera mayor tráfico e implica un mayor costo en comparación con MQTT, en un 452 % en promedio. Finalmente, sobre la base del precio referencial de datos móviles, se determina que el costo del servicio para la prueba de 20 solicitudes con MQTT y HTTP está entre 0.08 y 0.50 dólares respectivamente. La cantidad de tráfico generado en las distintas observaciones se puede apreciar en la figura 9.

Figura 9. Tráfico generado en las distintas observaciones



4. Conclusiones y recomendaciones

Se diseñó e implementó un sistema que obtiene los datos de una WSN por medio de un *smartphone*, donde se ejecuta una aplicación que hace la función de un *gateway* móvil que permite procesar, determinar un protocolo de IoT (HTTP o MQTT) y enviar los datos a plataformas IoT mediante una red de servicio móvil avanzado 4G LTE. De los resultados de las pruebas de rendimiento, el protocolo MQTT presenta las mejores prestaciones en latencia, consumo de energía y datos móviles, al incrementar el número de solicitudes; esto implica una mayor disponibilidad de batería, menor tiempo y costo en la transmisión de datos. Además, el sistema permite flexibilidad para incrementar funcionalidades mediante la integración de otras tecnologías de comunicación y de protocolos de IoT para integrar más nodos, expandir la cobertura de la red y áreas de aplicación como mediciones inteligentes para servicios de agua y electricidad.

Finalmente, se recomienda analizar la integración de la función al *gateway* móvil, la capacidad de analizar los datos por medio de inteligencia artificial con el objeto de reducir el tiempo de respuesta, al no disponer de sistemas centralizados como las actuales plataformas de IoT.

Referencias

- Arcotel. (2017). *4G es la cuarta generación de tecnología de telefonía móvil*. Retrieved on March, 2020, from <https://bit.ly/3bqllMn>
- Arcotel. (2018). *Arcotel Informa No19*. Retrieved on March, 2020, from <https://bit.ly/3h8RFWx>
- Cabrera-Goyes, E., & Ordóñez-Camacho, D. (2018). Posicionamiento en espacios interiores con Android, Bluetooth y RSSI. *Enfoque UTE*, 9(1), 118–126. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n1.238>
- Cisco. (2016). *Internet of Things*. CISCO-LABS. <https://bit.ly/3buPGdW>
- Díaz-Zayas, A.; García-Pérez, C. A.; Recio-Pérez, M. y Merino, P. (2016). 3GPP Standards to Deliver LTE Connectivity for IoT. *2016 IEEE First International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI)*, 283–288. doi: 10.1109/IoTDI.2015.26
- Hillar, G. C. (2017). *MQTT Essentials: A Lightweight IoT Protocol: The Preferred IoT Publish-Subscribe Lightweight Messaging Protocol*. Packt Publishing.
- IBM. (2019). *IBM Watson Internet of Things*. Retrieved on March, 2020, from <https://ibm.co/2QZGfta>
- IBM, I. B. M. C. (2010). *MQTT V3.1 Protocol Specification*. Retrieved on March, 2020, from <https://ibm.co/3gUmo9y>
- Kurose, J. y Ross, K. (2017). *Redes de computadoras : Enfoque descendente* (7ª. ed.). Pearson.
- Majdi, M. (2013). *A comparative Overview of Modern Communication Systems and Standards*. KTH, School of Electrical Engineering (EES). <https://bit.ly/3gX4VgN>
- Manandhar, S. (2017). MQTT based Communication in IoT. *TREPO* <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/25376>
- Naik, N. (2017). Choice of Effective Messaging Protocols for IoT Systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. *2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, 1–7. doi: 10.1109/Sys-Eng.2017.8088251
- Fitchard, K. (2018). As 4G reach in Latin America improves, so does the consumer experience. *Opensignal*. <https://bit.ly/2QXfxla>
- Paho, E. (2019). *Eclipse Paho Android Service*. Recuperado el 25 de septiembre de 2019 de <https://bit.ly/3h3Vdci>
- Qualcomm Technologies, I. (s. f.). *App Tune-up Kit*. Recuperado el 25 de septiembre de 2019 de <https://bit.ly/3i1ssOS>
- Qualcomm Technologies, I. (2019). *Treppn Power Profiler*.
- Rodríguez, D. M.; Bayona, E. y Rosado, A. A. (2019). Summary of the Internet of Things and its Application in Agro-industrial Production. *Journal of Physics: Conference Series 1409*, 12018. doi: 10.1088/1742-6596/1409/1/012018
- Santos, J.; Rodrigues, J. J. P. C.; Silva, B. M. C. et al. (2016). An IoT-based Mobile Gateway for Intelligent Personal Assistants on Mobile Health Environments. *Journal of Network and Computer Applications 71*, 194–204. doi: 10.1016/j.jnca.2016.03.014
- Sthepen, N. (2012). *Power Profiling: HTTPS Long Polling vs. MQTT with SSL, on Android*. Scoop.it. <http://sco.it/7IR1rV>
- Ubidots. (s. f.). *Android SDK*. Recuperado el 5 de agosto de 2019 de <https://bit.ly/3gYosNS>
- Ubidots. (2019). *Ubidots : Data Drives Decisions*. Retrieved on August, 2019 from <https://bit.ly/3i1mZHT>
- Yokotani, T. y Sasaki, Y. (2016). Comparison with HTTP and MQTT on Required Network Resources for IoT. *2016 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, 1–6. doi: 10.1109/ICCEREC.2016.7814989
- Zimmermann, K. A. y Empspak, J. (2017). Internet History Timeline: Arpanet to the World Wide Web. *LiveScience*. <https://bit.ly/3i4e9cj>

Mass trapping of *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae) using light and sex-pheromone traps in cotton

(Captura masiva de *Pectinophora gossypiella* (Lepidoptera: Gelechiidae) utilizando trampas ligeras de feromonas sexuales en el algodón)

Muhammad Arshad¹, Muhammad Irfan Ullah², Muhammad Wasim Abbas³, Asad Abdullah⁴, Usama Hassan⁵

Abstract

The pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae) is an important insect pest of the cotton crop worldwide. Sex-pheromone and light traps were used to monitor the adult *P. gossypiella* population in Bt cotton field for the years 2017-18 at southern Punjab, Pakistan. The sampling of infested bolls was done to record the damage level of *P. gossypiella*. The sex-pheromone traps captured approximately 2-3 times more adults than light traps in all locations during 2017-18. For sex-pheromone traps, temperature showed negative and strong relation ($R^2 = 0.63-0.80$) with trap catches. Fewer bolls (7.0-9.0%) were infested in plots where sex-pheromone traps were installed compared to check plots (32-37%). Therefore, the pheromone trapping proved an effective and eco-friendly tool for the monitoring and management of *P. gossypiella*. Our findings enable forecasting of seasonal *P. gossypiella* population providing additional information for the development of an integrated pest management program for this pest.

Keywords

Cultural control, Integrated pest management, Mass trapping, *Pectinophora gossypiella*

Resumen

La lagarta rosada, o gusano rosado del algodón, *Pectinophora gossypiella* (Lepidoptera: Gelechiidae) es una importante plaga de insectos del cultivo del algodón en todo el mundo. Para monitorear la población adulta de *P. gossypiella* en el campo de algodón Bt, se utilizaron trampas de luz y feromonas sexuales, durante los años 2017-18 en el sur de Punjab, Pakistán. El muestreo de cápsulas infestadas se realizó para registrar el nivel de daño de *P. gossypiella*. Las trampas de feromonas sexuales capturaron aproximadamente 2-3 veces más adultos que las trampas de luz en todos los lugares durante 2017-18. Para las trampas de feromonas sexuales, la temperatura mostró una fuerte relación negativa ($R^2 = 0,63-0,80$) con las capturas de trampas. Se infestaron menos cápsulas (7.0-9.0%) en las parcelas donde se instalaron trampas de feromonas sexuales en comparación con las parcelas de control (32-37%). Por lo tanto, la captura de feromonas resultó ser una herramienta eficaz y ecológica para el seguimiento y manejo de *P. gossypiella*. Los hallazgos permiten pronosticar la población estacional de *P. gossypiella* proporcionando información adicional para el desarrollo de un programa de manejo integrado para esta plaga.

Palabras clave

Control cultural, Manejo integrado de plagas, Captura masiva, *Pectinophora gossypiella*

- 1 Department of Entomology, University of Sargodha, Pakistan. [makuaf@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5442-0380>]
- 2 Department of Entomology, University of Sargodha, Pakistan. [m.irfanullah@uos.edu.pk, <https://orcid.org/0000-0002-2463-2665>]
- 3 Pest Warning and Quality Control of Pesticides, Punjab, Pakistan. [swasim.abbas@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3455-328X>]
- 4 Department of Entomology, University of Sargodha, Pakistan. [asadabdullah798@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9059-1806>]
- 5 Department of Entomology, University of Sargodha, Pakistan. [usamahassan9394@gmail.com]

1. Introducción

Cotton, *Gossypium hirsutum* (L.) is one of the principal commercial crops and is cultivated on an area of 2.699 million hectares with an average of 11.94 million bales (Pakistan Economic Survey, 2017-18). The lepidopterous insect pests pose challenges to the cotton growers in achieving profitable cotton yield. Among the lepidopterans, the pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae) significantly affects the cotton crop and is difficult to control with insecticides (Lykouressis et al., 2005).

For the last few decades, extensive research work has been done on the development of integrated pest management program (IPM) for *P. gossypiella* (Naranjo and Ellsworth, 2010; Tabashnik et al., 2012). This insect has largely been exposed to transgenic cotton in cotton-producing countries; China, United States of America and India (Carrière et al., 2005; Huang et al., 2011; Wan et al., 2012; Choudhary and Gaur, 2015). Now, it has developed resistance to Bt toxin Cry1Ac and also against the combination with Bt toxin Cry2Ab (Dhurua and Gujar, 2011; Fabrick et al., 2014; Carrière et al., 2016; Mohan et al., 2016). Various control tactics like cultural practices, the release of sterile insects, mating disruption with pheromones and insecticide applications are being used for the control of *P. gossypiella* populations (Naranjo and Ellsworth, 2010; Tabashnik et al., 2010). However, the light traps have also been used to manage agricultural insect pests in many countries such as Brazil, China, and India (Jiang et al., 2008; Ma et al., 2009; Cowan and Gries, 2009).

Ecological research of the heliothine moths is the evidence of common usage of pheromone and light traps (Kant & Kanaujia, 2008; Feng et al., 2009). Insect-trapping provides information with relevance to early warnings about crop infestation associated to ecological conditions (Del-Socorro and Gregg, 2001; Domotor et al., 2007; Jackson et al., 2008), and monitor the fluctuations of insect population at long-term basis (Adamczyk and Hubbard, 2006; Zalucki et al., 2009). Trap-catching can be helpful for the effective management of insect pests by the prediction of infestation rate and crop damage (Spear-O'Mara and Allen, 2014).

Our main objective was to evaluate the comparative effectiveness of gossyplure sex-pheromone [Z7 Z11 – 16AC (50), Z7 E11 – 16AC (50) hexadecadienyl acetate with light traps in monitoring of *P. gossypiella* adults in cotton crop at the southern region of Punjab, Pakistan.

2. Metodología

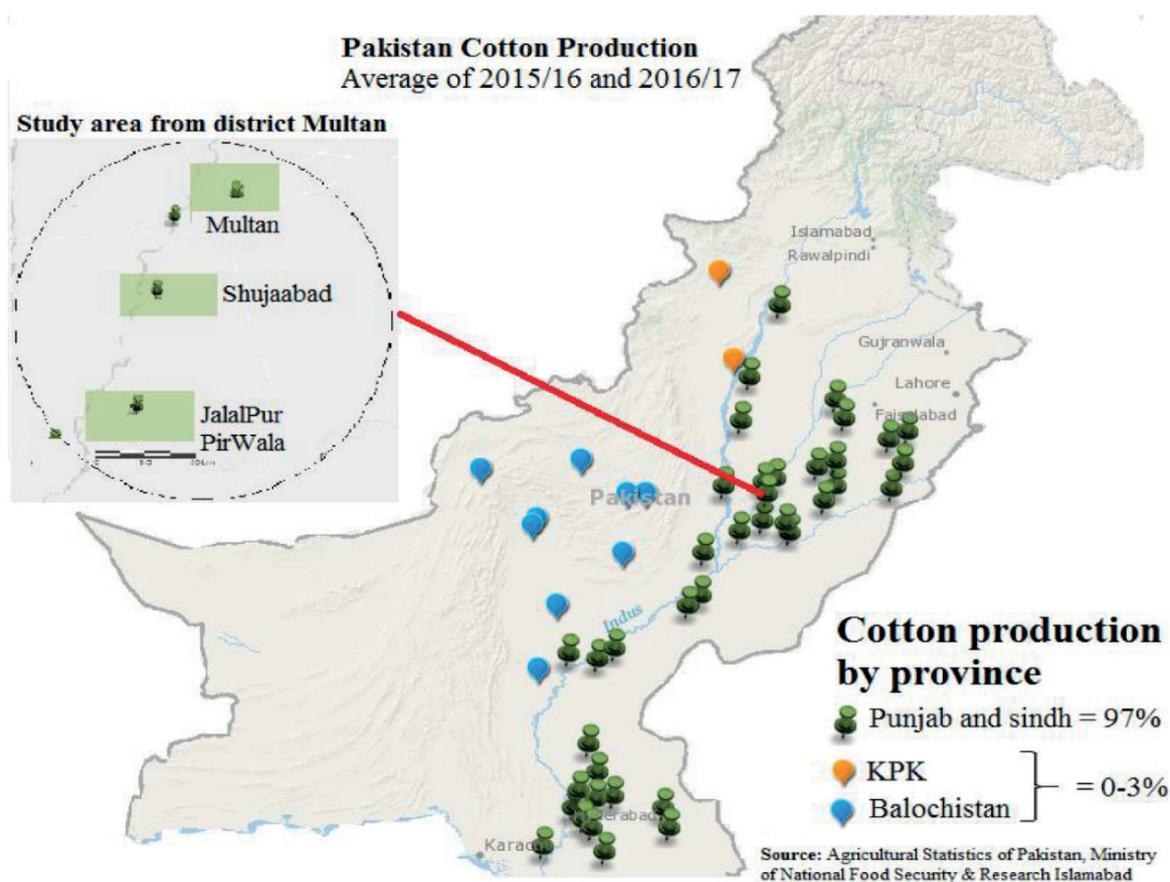
2.1. Experimental site

The study was conducted in three localities; Multan (MLT) (30°07'11.2"N 71°32'37.7"E), Shujabad (SJD) (29°47'56.6"N 71°19'14.5"E) and Jalal Pur Pirwala (JPP) (29°31'09.4"N 71°14'14.1"E) at southern Punjab of Pakistan. The selected localities are about 45 km apart from each other. The selected regions are the main cotton producing areas in Pakistan (Figure 1).

The climate of these areas is mostly hot and dry, with a maximum of 40-44 °C and minimum 4-10 °C temperature. The wettest month with high rainfall is July and the driest is October (Meteorological Department, Multan, Punjab, Pakistan, 2018). During 2017 and 2018, three plots were selected from each locality and the area of each plot was about 8.24 acres. Each plot was further divided into 3 blocks. One block was selected for pheromone traps only, 1 for light traps and 1 for check plot (insecticide-treated). One application of each insecticide; bifenthrin

10% EC, Gamma-Cyhalothrin 60% CS and triazophos 40% EC with 10 days interval was applied in rotation throughout the season in check plots. However, no insecticide was applied in both trapping plots. The cotton variety used in this study was Bt-2013 and sowing in all the selected regions took place between 1st to 5th May during 2017. While in 2018, sowing was done from 25 April to 1st May. In all selected plots from each location, similar practices for irrigation, cultivation, and fertilization were applied according to the recommendations of Agriculture Extension Department, Multan, Pakistan.

Figure 1. A map of Pakistan showing the selected study sites across the cotton production areas



2.2. Moth trapping

Two sex-pheromone traps were installed at field edges (each at the opposite side) in each selected block. The delta traps were installed with the gossypure sex-attractant pheromone [Z7 Z11 – 16AC (50), Z7 E11 – 16AC (50) hexadecadienyl acetate, (Shin-Etsu Corporation, Tokyo, Japan)]. Each trap was placed at least 60 m apart and rebaited every 2 weeks. The traps were placed at ca. 1 m height almost top level of the plant canopy. Two light traps (CSIRO-designed cone light traps) were fixed on the opposite edge of each selected block.

2.3. Catches - infestation

For the infestation level of *P. gossypiella*, 300-500 bolls were sampled from each plot. The sampling was done in August and September within the first 40 rows near field edges during both seasons. Not more than one boll per plant was selected and after collection, the bolls were transferred into the laboratory and were kept at ambient temperature. Percent of boll infestation was calculated according to the formula suggested by Hajatmand et al. (2015):

$$I = \frac{N-i}{N} \times 100$$

Where

I = infestation level

N = total number of bolls sampled

i = number of infested bolls

2.4. Data analysis

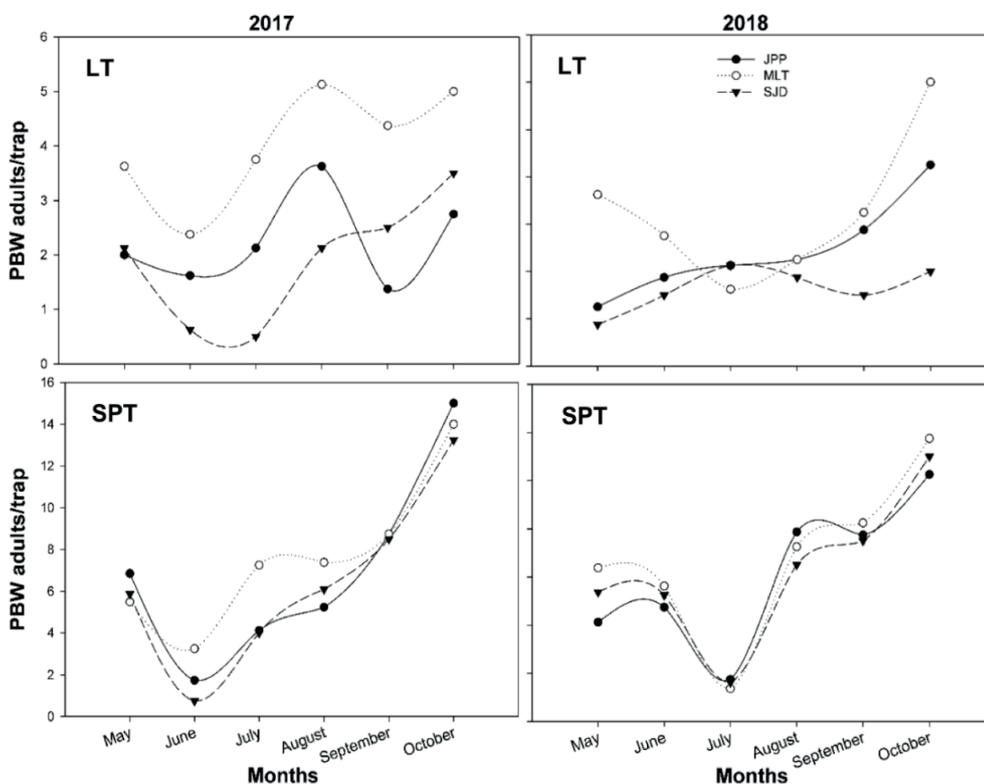
Data for adult *P. gossypiella* captures were analyzed using two-way ANOVA by keeping the locations and month as the main factor after checking the normality. Means were compared with tukey HSD all-pairwise comparison test. Abiotic data (temperature, humidity, and rainfall) was collected from the Metrological Department Multan, Pakistan to determine the relation with trap catches. All the data were analyzed using Minitab 17.0 statistical software.

3. Resultados

More adults were captured in sex-pheromone traps compared to light traps. During 2017, the range of adults captured per sex pheromone trap was 3.0-14.0 adults/trap in MLT, 0.7-13.3 adults/trap in SJD and 1.0-15.0 adults/trap in JPP location. During 2018, about 3.0-13.8 adults per sex-pheromone trap in MLT and SJD were captured followed by 3.0-12.3 adults/trap in JPP location. In the light trap, about 1.0-5.5 adults/trap was captured in all locations during both years (Figure 2).

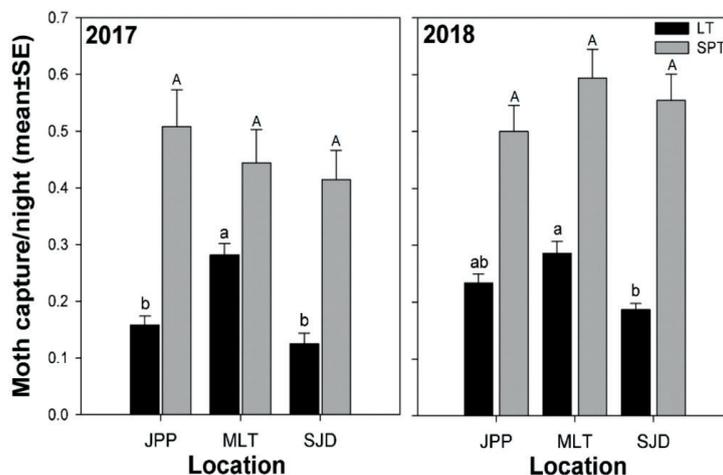
A significant difference (2017: $F = 21.4$, $P < 0.001$; 2018: $F = 8.40$, $P < 0.001$) of catches were found in light traps from different locations. During 2017, highest numbers of moths (0.282 adult/night/trap) were captured in light trap from MLT than other locations. In pheromone trap, highest 0.508 adults/night/trap was collected from JPP, however no significant (2017: $F = 0.65$, $P > 0.05$; 2018: $F = 0.25$, $P > 0.05$) difference was found among localities. About 0.286 moth/night was captured in the light trap from MLT that was significantly ($P < 0.001$) higher compared to the other two locations.

Figure 2. Average number of *Pectinophora gossypiella* adults captured per sex-pheromone and light trap from different locations during 2017-18



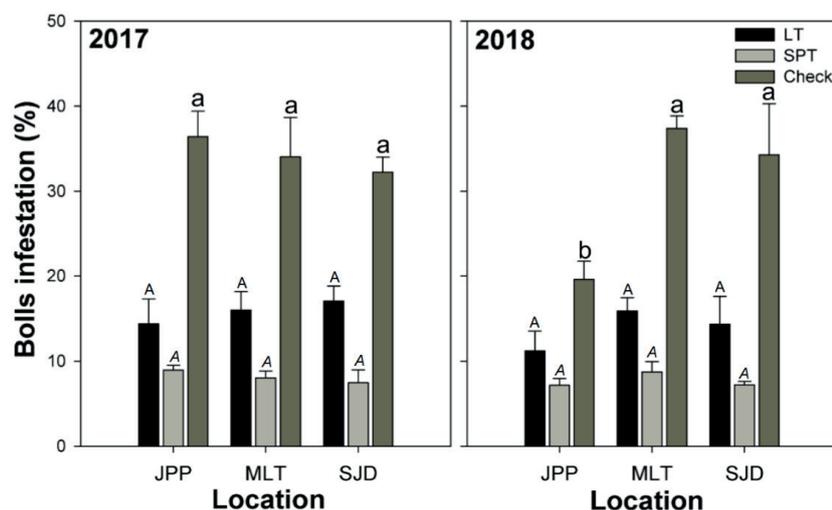
However, no significant difference ($P > 0.05$) of moth captured per night from different locations was found in case of a sex-pheromone trap. Among the locations, there was a significant difference ($P < 0.001$) in per night catches between two traps (Figure 3).

Figure 3. Average number of *Pectinophora gossypiella* adults captured per night per sex-pheromone and light tap from different locations during 2017-18, means sharing similar letters for light taps are not significantly different, for sex-pheromone trap, no significant ($P > 0.05$) difference was found in moth capture/night/trap



During both study years, the infestation of the boll was significantly different ($P < 0.001$) in trap-installed and check plot for each location. During 2017, no significant ($P > 0.05$) difference was found in bolls-infestation for treated and check plots across locations. However, the percent of boll-infestation was higher 32-37% in check plots. The infestation rate was lower (7.0-9.0%) in the plots where sex-pheromone traps were installed compared to light traps (14.0-17.5%). During 2018, no significant ($P > 0.05$) difference of boll-infestation across locations was found in plots where light and sex-pheromone traps were installed. However, a significant difference ($F = 6.33$, $P < 0.05$) of percent boll-infestation was found in check plots. The percent infestation was found higher (37.4%) in check plots of MLT followed by 34.3% in SJD and 19.6% in JPP location. The rate of boll-infestation was similar in traps-installed plots as in 2017 (Figure 4).

Figure 4. Percent bolls-infestation (means \pm SE) due to *Pectinophora gossypiella* in trap-installed plots in comparison to check plot from different locations during 2017-18, no significant ($P > 0.05$) difference was found in bolls-infestation for all plots during 2017 and except check plot in 2018



Regression analysis showed that abiotic factors had no significant effect in trap catches during both years except temperature ($R^2 = 0.80$ for 2017 and 0.63 for 2018) that showed negative relation in case of the sex-pheromone trap (Table 1).

Table 1. Relation of abiotic factors with number of adult catches (Y) using sex-pheromone and light traps during 2017-18

	Variables (X)	Light trap			Sex-pheromone trap		
		Slope (a)	Intercept (b)	R ²	Slope (a)	Intercept (b)	R ²
2017	Temperature	-0.276	11.52	0.17	-1.74	62.39	0.80
	Humidity	0.068	-1.90	0.13	0.47	-2.43	0.14
	Rainfall	-0.113	0.062	0.17	-0.35	8.53	0.20
2018	Temperature	-0.273	0.089	0.37	-0.88	36.2	0.63
	Humidity	0.037	0.917	0.07	0.131	-0.60	0.14
	Rainfall	-0.297	3.717	0.09	-2.05	10.23	0.72

R² = coefficient of determination, regression equation = $Y = a + bX$

4. Discusión

The trap catching system would be useful in monitoring *P. gossypiella* populations and would help cotton growers to develop IPM strategies for the effective management of this pest (Even-den et al., 2016; Evenden, 2018). Pheromone traps were very effective in reducing the *P. gossypiella* with a high number of adult catches during both study years compared to a light trap. It shows the effectiveness of pheromone for male disorientation resulting in low mating success and reduction in oviposition rate in the field (Lykouressis et al., 2005). The adult capture may depend on three factors, temperature, relative humidity, and wind speed. According to Salem et al. (1990), maximum moth captured at 18.6 °C temperature, 65-70% humidity with 6.95 m/s wind speed. The rate of moth capturing per night was also high using sex-pheromones than the light trap in all three locations. Sex pheromone chemicals are species-specific which remains active at very low doses and are very effective in pest management in agricultural, landscape and forest areas. In contrast, the light trap is a visual attractant and attracts various insect species (Shah et al., 2011). Sex-pheromone has large attraction radius compared to light traps, therefore, more insects attract towards pheromone. In contrast to pheromone traps, the light traps are highly affected by natural factors like temperature, wind speed, rainfall and cloud cover (Yela and Holyoak, 1997). The non-target insect species especially the beneficial insects are also attracted and killed by light traps (Nabli et al., 1999), so it is a major concern as this might affect the biological control of insect pests in the field. So, pheromone traps are not harmful to the natural enemies and can be used with other control tactics such as synthetic insecticides for the effective management of *P. gossypiella* (Qureshi et al., 1985). It would likely be more effective in integrating with a recommended insecticide. So, the insecticidal application can be minimized using pheromone trapping with a specific interval. The effectiveness of mating disruption techniques with other methods has been reported earlier (Yamanaka, 2007; Suckling et al., 2014). According to Mamun et al. (2014), a combination of pheromone traps with spinosad provided maximum protection of brinjal fruits from brinjal shoot and fruit borer, *Leucinodes orbonalis* Guen. (Lepidoptera: Pyralidae).

It is important to note that no chemical treatments were applied in the trap-installed-plots however, the bolls-infestation rate was lower in both traps as compared to check plot where insecticides were applied with a regular interval to manage the lepidopterous insect pests. The average infestation rate did not exceed 9.0% in the plots protected by pheromone trapping versus 19.0-35.0% in check plots. However, it is important to note that the data for bolls infestation was taken at the harvest time. Thus, the pheromone trapping has a significant effect in controlling the *P. gossypiella* as indicated by a smaller number of damaged bolls of cotton. Reduced mating would lead to the reduction of *P. gossypiella* larvae in the cotton field. Our results showed that temperature had a significantly negative effect on the trap catches through sex-pheromone traps. Previously researchers have reported that the temperature is the important factor in the fluctuations of trap catches of many lepidopterous insects (Butler et al., 1999; Reardon et al., 2006). It might be possible that detection distance increases due to an increase in pheromone volatility with temperature (Heuskin et al., 2011).

The implementation of using pheromone and synthetic insecticides when needed could be the major components in IPM and could be helpful not only to reduce the production cost of cotton but also in increasing the yield. The insecticidal control of *P. gossypiella* is not effective unless the timing and number of applications with great precision. The harmful effect of using

synthetic chemicals on the non-target insect pests, human health and environment is another major concern. Contrarily, mating disruption techniques are effective in controlling the *P. gossypiella* and have no adverse effects on the beneficial insects and environment.

5. Conclusiones y recomendaciones

Overall, our findings highlight the extreme variability in moth catches using sex-pheromone and light traps. It would be useful to better understand the density or abundance of *P. gossypiella* in the cotton field. Pheromone trapping is a very convenient method and is useful for the effective management of *P. gossypiella*. Further study should be conducted on trapping efficiency in different cotton cultivars with trap-cost ratio.

References

- Adamczyk, J. J. & Hubbard, D. (2006). Changes in Populations of *Heliothis virescens* (F.) (*Lepidoptera: Noctuidae*) and *Helicoverpa zea* (Boddie) (*Lepidoptera: noctuidae*) in the Mississippi Delta from 1986 to 2005 as Indicated by Adult Male Pheromone Traps. *Journal of Cotton Science* 10: 155–160.
- Butler, L.; Kondo, V.; Burrows, E. M. and Townsend, E.C. (1999). Effects of Weather Conditions and Trap Types on Sampling for Richness and Abundance of Forest Macro-lepidoptera. *Environmental Entomology* 28: 795–811.
- Carrière, Y., Eilers-Kirk, C., Biggs, R. et al. (2005). Effects of Cotton Cultivar on Fitness Costs Associated with Resistance of Pink Bollworm (*Lepidoptera: Gelechiidae*) to Bt Cotton. *Journal of Economic Entomology* 98: 947–54.
- Carrière, Y.; Fabrick, J. A. and Tabashnik, B. E. (2016). Advances in Managing Pest Resistance to Bt Crops: Pyramids and Seed Mixtures, (pp. 263–286). In: Horowitz, A.R., Ishaaya, I. (eds.). *Advances in Insect Control and Resistance Management*. Springer, New York.
- Choudhary, B. and Gaur, K. (2015). Biotech Cotton in India, 2002 to 2014. *ISAAA Series of Biotech Crop Profiles*. ISAAA: Ithaca, NY.
- Cowan, T. and Gries, G. (2009). Ultraviolet and Violet Light: Attractive Orientation Cues for the Indian Meal Moth, *Plodia interpunctella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 131: 148–158.
- Del Socorro, A. P. & Gregg, P. C. (2001). Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Pollen as a Marker for Studies of Local Movement in *Helicoverpa armigera* (Hubner) (*Lepidoptera: Noctuidae*). *Australian Journal of Entomology* 40: 257–263.
- Dhuria, S. and Gujar, G. T. (2011). Field Evolved Resistance to Bt toxin Cry1Ac in the Pink Bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (*Lepidoptera: Gelechiidae*), from India. *Pest Management Science* 67: 898–903
- Domotor, I.; Kiss, J. and Szocs, G. (2007). First Results on Synchrony Between Seasonal Pattern of Pheromone Trap Captures of Cotton Bollworm, *Helicoverpa armigera* and Appearance of Freshly Emerged Larvae on Developing Cobs of Corn Hybrids. *Journal of Pest Science* 80: 183–189.
- Evenden, M.; Whitehouse, C.; Onge, A. S. et al. (2016). Potential for Semiochemical-based Monitoring of the Pea leaf Weevil (*Coleoptera: Curculionidae*) on Field Pea (*Fabaceae*) in the Canadian Prairie Provinces. *Canadian Entomologist* 148: 595–602.
- Evenden, M. L. (2018). Semiochemical-based Management of the Pea Leaf Weevil (*Coleoptera: Curculionidae*). *Annals of the Entomological Society of America* 111: 154–160.
- Fabrick, J. A.; Ponnuraj, J.; Singh, A. et al. (2014). Alternative Splicing and Highly Variable Cadherin Transcripts Associated with Field-Evolved Resistance of Pink Bollworm to Bt Cotton in India. *PLoS ONE* 19(5): e97900.

- Feng, H.; Wu, X.; Wu, B. and Wu, K. (2009). Seasonal Migration of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) over the Bohai Sea. *Journal of Economic Entomology* 102: 95–104.
- Heuskin, S.; Verheggen, F.J.; Haubruge, E.; Wathélet, J. P. & Lognay, G. (2011). The Use of Semiochemical Slow-Release Devices in Integrated Pest Management Strategies. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 15: 459–470.
- Huang, F.; Andow, D. A. and Buschman, L. L. (2011). Success of the High-dose/refuge Resistance Management Strategy after 15 years of Bt Crop Use in North America. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 140: 1–16.
- Jackson, R. E., Bradley, J.R.; Van Duyn, J. et al. (2008). Regional Assessment of *Helicoverpa zea* Populations on Cotton and Non-cotton Crop Hosts. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 126: 89–106.
- Jiang, Y. L.; Duan, Y. and Wu, Y. Q. (2008). Effects of Green-yellow Light with Three Different Wavelengths on the Oviposition Biology of *Spodoptera exigua* (Hübner). *Acta Phytophylacica Sinica* 35: 473–474.
- Kant, K. & Kanaujia, K. R. (2008). Relationship Between Moth Catches in Pheromone Trap and Larval Population Development of *Helicoverpa armigera* (Hub.) in Chickpea. *Environment and Ecology* 26: 780–782.
- Lykouressis, D.; Perdikis, D.; Samartzis, D.; Fantinou, A. & Toutouzias, S. (2005). Management of the Pink Bollworm *Pectinophora gossypiella* (Saunders) (Lepidoptera: Gelechiidae) by Mating Disruption in Cotton Fields. *Crop Protection* 24: 177–183.
- Ma, C. S.; Ma, G.; Chang, X. Q. & Yang, H. P. (2009). Environment Friendly Methods for Controlling Cotton Bollworm Moths, *Helicoverpa armigera*. *Chinese Journal of Environmental Entomology* 31: 220–226.
- Mamun, M. A. A.; Islam, K. S.; Jahan, M. and Das, G. (2014). Comparative Potency of Three Insecticides Against the Infestation of Brinjal Shoot and Fruit Borer, *Leucinodesorb onalis* Guen. *Scholars Academic Journal of Biosciences* 2: 364–369.
- Mohan, K. S.; Ravi, K. C.; Suresh, P. J.; Sumerford, D. and Head, G. P. (2016). Field Resistance to the *Bacillus thuringiensis* Protein Cry1Ac Expressed in Bollgard® Hybrid Cotton in Pink Bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saunders), Populations in India. *Pest Management Science* 72: 738–746.
- Nabli, H.; Bailey, W. C. & Necibi, S. (1999). Beneficial Insect Attraction to Light Traps with Different Wavelengths. *Biological Control* 16: 185–188.
- Naranjo, S. E. and Ellsworth, P. C. (2010). Fourteen Years of Bt Cotton Advances IPM in Arizona. *Southwestern Entomologist* 35: 437–445.
- Pakistan Bureau of Statistics. (2018). *Pakistan Economic Survey, 2017-18*. Ministry of Finance, Government of Pakistan. Retrieved on 2020, from http://www.finance.gov.pk/survey/chapters_18/Economic_Survey_2017_18.pdf
- Qureshi, Z. A.; Ahmed, N. and Bughio, A. R. (1985). Efficacy of Gossypure for the Control of Pink Bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saund.) (Lep., Gelechiidae). *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* 100: 476–479.
- Reardon, B. J.; Sumerford, D. V. & Sappington, T. W. (2006). Impact of Trap Design, Windbreaks, and Weather on Captures of European Corn Borer (*Lepidoptera: Crambidae*) in Pheromone-baited Traps. *Journal of Economic Entomology* 99: 2002–2009.
- Salem, S. A.; Radwan, S. M. E. & Hamaky, M. A. (1990). Prospects of Using Sex Pheromone for the Control of Cotton Bollworms, *Earias insulana* Boisd. and *Pectinophora gossypiella* Saund, in Cotton Fields. *Annals of Agricultural Sciences* 28: 1743–1752.
- Shah, M. A.; Memon, N. and Baloch, A. A. (2011). Use of Sex Pheromones and Light Traps for Monitoring the Population of Adult Moths of Cotton Bollworms in Hyderabad, Sindh, Pakistan. *Sarhad Journal of Agriculture* 27: 435–442.
- Spear-O'mara, J. and Allen, D. C. (2014). Monitoring Populations of Saddled Prominent (Lepidoptera: Notodontidae) with pheromone-baited traps. *Journal of Economic Entomology* 100: 335–342.

- Suckling, D. M.; Stringer, L. D.; Baird, D. B. et al. (2014). Light Brown Apple Moth *Epiphyas postvittana* (Lepidoptera: Tortricidae) Colonization of California. *Biological Invasions* 16: 1851–1863.
- Tabashnik, B. E.; Sisterson, M. S.; Ellsworth, P. C. et al. (2010). Suppressing Resistance to Bt Cotton with Sterile Insect Releases. *Nature Biotechnology* 28: 1304–1307.
- Tabashnik, B. E.; Wu, K. and Wu, Y. (2012). Early Detection of Field-evolved Resistance to Bt Cotton in China: Cotton Bollworm and Pink Bollworm. *Journal of Invertebrate Pathology* 110: 301–306.
- Wan, P.; Huang, Y.; Wu, H. et al. (2012). Increased Frequency of Pink Bollworm Resistance to Bt toxin Cry1Ac in China. *PLoSOne* 7: e29975.
- Yamanaka, T. (2007). Mating Disruption or Mass Trapping? Numerical Simulation Analysis of a Control Strategy for Lepidopteran Pests. *Population Ecology* 49: 75–86.
- Yela, J. L. and Holyoak, M. (1997). Effects of Moonlight and Meteorological Factors on Light and Bait Trap Catches of Noctuid Moths (Lepidoptera: Noctuidae). *Environmental Entomology* 26: 1283–1290.
- Zalucki, M. P.; Adamson, D. & Furlong, M. J. (2009). The Future of IPM: Whither or Wither? *Australian Journal of Entomology* 48: 85–96.

Estudio comparativo para propagación vegetativa de *Chondracanthus chamissoi* “Yuyo” sobre tres tipos de sustrato en ambiente controlado y su viabilidad en la región Moquegua

(Comparative study for vegetative propagation of *Chondracanthus chamissoi* “Yuyo” on three types of substrate in a controlled environment and its viability in the Moquegua region)

Jose Carlos Zapata-Rojas¹, Alejandro Marcelo Gonzales-Vargas², Sheyla Amanda Zevallos-Feria³

Resumen

La investigación compara la propagación vegetativa de *Chondracanthus chamissoi*, conocida también como “Yuyo” en Perú, en tres tipos diferentes de sustrato, bajo condiciones controladas en laboratorio. Los sustratos usados para la comparación fueron; TA; valva de almeja, TB; Malla de fruta, TC; cabo de propileno y TP; concha de *Concholepas concholepas*. Según el estudio, existió mejor supervivencia en TB, determinando la formación de (DFS) a partir de 20 a 23 días. Según los resultados, la estrategia de propagación vegetativa es viable para el escalamiento comercial en el litoral de Moquegua, Perú.

Palabras Clave

Macroalga; *C. chamissoi*; crecimiento vegetativo; supervivencia; DFS (Discos de fijación secundaria).

Abstract

The research compares the vegetative propagation of *Chondracanthus chamissoi*, commonly called “Yuyo” in Peru on three different types of substrate, under laboratory controlled conditions. The substrates used for comparison were; TA; clam leaflet, TB; Fruit mesh, CT; cape of propylene and TP; Concholepas concholepas shell. According to the study, there was better survival in TB; determining the formation of (DFS) from 20 to 23 days, according to the results, the vegetative propagation strategy is viable for commercial escalation in the coast of Moquegua, Peru.

Keywords

Macroalgae; *C. chamissoi*; vegetative growth; survival; DFS (Secondary Fixing Disks).

1. Introducción

Chondracanthus chamissoi es una especie autóctona y propia de la costa templada del Pacífico sur, que se dispone desde Paita-Perú hasta Chiloé-Chile y reside en las áreas rocosas del intermareal y submareal. En la actualidad, las algas están consideradas dentro del grupo de súper alimentos, debido a sus elevadas propiedades nutritivas.

Según información de la FAO (2018b), en el año 2016 la producción mundial de algas marinas llegó a alrededor de 30.8 millones de toneladas, de las cuales el 98 % de la producción provenía de la acuicultura y el 2 % restante provenía de la cosecha de camas naturales. La contribución de América Latina solamente llegó al 1.2 % de esta producción (373 mil toneladas), donde

1 Universidad Nacional de Moquegua, Perú. [zapatarojasjosecarlos@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5050-4512>]

2 Universidad Nacional de Moquegua, Perú. [alejandromgonzales@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-3256-907X>]

3 Instituto del Mar del Perú, Perú. [amandazevallosferia@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8964-5240>]

la aportación del país chileno representa el 88 %. Mientras que la producción restante se divide entre Perú con 15 293 toneladas (4.1 %) y México con 13 801 toneladas (3.7 %). Con respecto al cultivo de algas, el principal productor para Latinoamérica es Chile, siendo abastecedor del 95 % de la producción (14 846 toneladas). Le siguen Brasil (4.68 %), México (1.15 %), Ecuador (0.03 %) y Perú (0.01 %). Actualmente la demanda de *C. chamissoi* es alta y sigue en crecimiento.

La actividad extractiva y recolección del recurso hidrobiológico en los últimos años se ha incrementado rápidamente en el litoral sur del Perú (Delgado, E. y Chang, F., 2015; Imarpe, 2010), evidenciándose una creciente demanda en el mercado nacional e internacional. El principal destino para la producción de algas peruanas es el mercado asiático, con precios de US\$ 11 FOB por kilo, figurando entre las más cotizadas luego de las algas pardas al "yuyo" *C. chamissoi*. Por lo tanto, en Perú y en otros países abastecedores del producto, existe un estricto estándar de calidad que engloba cualidades como: limpieza, libre de epífitas e impurezas, carencia de estructuras reproductivas, color y textura bien definidos.

Si el total de la producción se abasteciera solo de praderas naturales, sería difícil entregar cantidades suficientes de productos de calidad en un programa de producción confiable. Por este motivo, la acuicultura se visualiza como una de las alternativas más eficientes para la solución de este problema.

Bajo ese contexto, varios expertos realizaron investigaciones relacionadas a la propagación vegetativa de *C. chamissoi*, principalmente en Chile, obteniendo resultados atractivos para cultivar.

La implementación de la tecnología de cultivo de *C. chamissoi* en otras latitudes como en Chile es factible (Colque Arce, L. M., 2017), constituyendo una alternativa en la recuperación de praderas naturales de macroalgas y promoviendo la diversificación de la actividad acuícola para realizar un manejo adecuado de su pesquería; tecnología que incluye cultivos de propagación por esporulación y vía vegetativa. Se destacan experiencias con mejores resultados mediante propagación vegetativa por discos de fijación secundaria en sustrato natural (valvas de moluscos lamelibranquios) (Sáez y Macchiavello, 2018), método replicado en este estudio. Se ha observado una notable disminución en las algas cosechadas en Chile, pasando de 25 000 t en el año 2000 a solo 977 t en el año 2010 (Sernapesca, 2011).

Esto ha incrementado la presión extractiva de este preciado recurso hidrobiológico marino; en consecuencia, se busca alternativas para solucionar este problema, a través de la adaptación de volúmenes tecnológicos para desarrollar el cultivo de macroalgas; por lo que se deben efectuar estudios relacionados con la tecnología de propagación de "yuyo" *C. chamissoi* y validarlo en la región de Moquegua, con la finalidad de no depredar esta especie en beneficio del ecosistema marino y de las comunidades pesqueras asentadas en el litoral.

Por este motivo, la metodología de propagación vegetativa avizora una tendencia prometedora para el desarrollo de cultivo de *C. chamissoi* en el litoral marino peruano.

La investigación tiene como objeto primordial realizar un análisis de comparación de propagación vegetativa en tres tipos diversos de sustrato en ambiente controlado para la especie *C. chamissoi*, en el litoral de la región Moquegua, con la implementación del cultivo en laboratorio, la evaluación del periodo de formación de DFS y variables de crecimiento en longitud.

2. Metodología

El estudio se llevó a cabo en un ambiente controlado de las instalaciones del laboratorio de investigación acuícola del Instituto del Mar de Perú, sede Ilo.

El modelo de análisis se basó en un diseño experimental totalmente al azar, con tres repeticiones de tres diferentes tipos de tratamientos, resultando un total de nueve unidades experimentales. Los sustratos utilizados fueron las Valvas de Almeja, Mallas de fruta, cabo de polipropileno y la concha de chanque.

Los tratamientos empleados fueron: Tratamiento A: constituido por el cultivo de *C. chamissoi* mediante propagación vegetativa a partir de discos secundarios en Valvas almeja. Tratamiento B: constituido por el cultivo de *C. chamissoi* mediante propagación vegetativa a partir de discos secundarios en Malla de fruta. Tratamiento C: constituido por el cultivo de *C. chamissoi* mediante propagación vegetativa a partir de discos secundarios en cabo polipropileno. Tratamiento P: grupo control de *C. chamissoi* en concha de chanque. Posteriormente se usó el Método Gulland y el Modelo Ricker, sobre la base de las valoraciones del análisis comparativo experimental para obtener la evaluación de los factores de propagación y supervivencia de *C. chamissoi*.

En lo concerniente a las etapas de la experimentación se inició con la recolección de *C. chamissoi* (10 kg.) en los márgenes de la región de Moquegua, su medio natural de producción. Una vez colectadas, las frondas de láminas vegetativas juveniles fueron trasladadas en una caja isotérmica al laboratorio de Investigación Acuícola del Imarpe Ilo.

En el laboratorio, al material biológico (*C. chamissoi*) se le realizó un tratamiento con agua potable y agua de mar micro filtrada, hasta 1 μm , y se lo acondicionó en un tanque de fibra de vidrio contentivo de 200 litros de agua de mar estéril (micro filtrada hasta 1 μm e irradiada con luz ultravioleta), provisto con una piedra difusora para el suministro de aire moderado. Las condiciones del ambiente se mantuvieron a 18 °C y luz indirecta tenue. Asimismo, el tratamiento del sustrato se llevó a cabo con un lavado natural a las valvas de moluscos, con abundante agua; se desinfectó, utilizando hipoclorito de sodio al 5 %, se hizo un enjuague y posteriormente se procedió al secado. Para el caso de sustrato artificial, el tratamiento fue similar. Para el sistema de cultivo se implementó una sala climatizada con estantería distribuida en tres niveles, provista de luz artificial, mediante fluorescentes de 50 watts, conectados a un *timer*, que controla el encendido y apagado de la luz, según el fotoperiodo previsto y aire suministrado por un regenerador (Blower 2.5 HP).

En cuanto al desarrollo del cultivo, se utilizaron botellas plásticas con capacidad para 7 litros, que se rotularon sobre cada tratamiento. Cada receptáculo incluía 5 litros de agua de mar estéril, que fueron fertilizados con 3 ml del nutriente Provasoli, dos veces por semana (cada 3 días). Fueron colocados 100 g de "yuyo" por cada envase: (a) para el caso de los sustratos valvas de almeja, las frondas de morfología isomórfica fueron sujetadas con ligas y así se logaron fijar en el sustrato; (b) para la red de fruta, se introdujeron dentro los pedazos fragmentados de algas, con la ayuda de un tubo de policloruro de vinilo, a una pulgada de diámetro; (c) en el sustrato de polipropileno se sujetaron con rafia las frondas; y (d) para el grupo patrón las algas se aseguraron con ligas en valva de chanque. La limpieza del lugar de experimentación se efectuó con base en la técnica del sifoneo y cada 3 días se realizó la sanitización de materiales.

Durante el experimento, una vez acondicionado el material biológico, se evaluó la fijación de DFS y se expresó como porcentaje de los fragmentos adjuntos en relación al número total de fragmentos contenidos en cada botellón, para cada tratamiento. Una vez que se formaron los DFS, las frondas restantes fueron aisladas, evitando ser separadas del sustrato. En cuanto las algas fueron fijadas, se procedió a retirar las frondas que no formaron discos para su posterior monitoreo y cada 10 días se anotó el crecimiento de longitud en las piezas experimentales por cada tratamiento en un ambiente controlado. Y se procedió a medir el crecimiento y supervivencia. El crecimiento se analizó con base en el Método Gulland:

$$TC = (L_{t+1} - L_t) / (t_{+1} - t_t)$$

donde:

TC = Tasa de Crecimiento (mm) o (g)

t_t = Tiempo (días) de muestreo cero

t_{+1} = Tiempo de muestreo subsecuente al t_t

L_t = Longitud correspondiente al tiempo t_t

L_{t+1} = Longitud correspondiente al tiempo t_{+1}

Y la supervivencia se determinó por el Modelo Ricker:

$$\% S = N_{t_i} / N_{t_0} * 100$$

donde:

% S = Porcentaje de supervivencia.

N_{t_i} = Número de individuos sobrevivientes al tiempo "t".

N_{t_0} = Número total de individuos.

En el estudio comparativo se obtuvieron cantidades de cada unidad experimental, que se registraron en hojas de cálculo Excel, para su posterior análisis en el Software estadístico SPSS, versión 21, para determinar la normalidad de las cifras y la homocedasticidad en sus valores de varianzas, aplicando un Anova de una vía ($P = 0,05$). Con ello se aplicó el test de Tukey, comparando medias y contrastando las diferencias en la propagación con respecto a los tratamientos.

3. Resultados y discusión

3.1. Formación de discos de fijación secundarios:

El tratamiento (A), valvas de almeja sujetado con ligas, se conservó en un periodo de 23 días, con una alternancia de agua cada 7 días. Se adicionó nutriente al medio de cultivo (Provasoli 1ml / Lt. de agua de mar). La formación de DFS se examinó al día 20 y hacia el día 23 se procedió a retirar el tejido adulto, obteniendo ejemplares jóvenes, que fueron posteriormente registrados.

Para el caso del Grupo control (P), la formación de discos de fijación secundaria posee un tiempo similar al tratamiento (A), asimismo la manipulación durante los días de cultivo que duró el estudio.

Con respecto al Tratamiento (C), durante la primera etapa de estudio, se utilizó cabo de polipropileno como sustrato base para *C. chamissoi*. Pese a tener el mismo periodo de cultivo que los otros tratamientos y habiendo controlado las condiciones ambientales propias del cultivo, la formación de DFS no se dio. Sin este punto clave, no es posible pasar a la siguiente etapa del cultivo, por lo que a este tratamiento se le consideró no factible para la especie y por lo tanto se dio por finalizado. El uso de cabo de polipropileno fue utilizado por Arbaiza et al. (2019) y lograron la fijación de *C. chamissoi*, sin embargo para ello tuvieron que tratar el mismo con bicarbonato de sodio para crear una superficie calcárea que es un sustrato más apropiado. Al usar el cabo de polipropileno sin tratar, no se pudieron formar DFS en su superficie.

Las conclusiones de este análisis se contraponen a las de Arbaiza S. (2016), que después de 20 días evidenció la formación de DFS en todas las poblaciones de estudio y también la investigación de Sáez y Macchiavello (2018), quienes apreciaron que el periodo de cohesión de DFS fue de 25 días.

Bulboa et al. (2005), a través de los experimentos de cultivos en mar, observaron, que esta especie tiene la cualidad de formar un DFS sobre sustrato artificial, sujetando los talos de *C. chamissoi* al sustrato y evitando el desprendimiento, como estrategia de sobrevivencia en el tiempo, por lo que este estudio realizó el primer intento de corroborar dicha afirmación, utilizando el cabo de polipropileno.

Según Ernesto Pariona y Patricia Gil-Kodaka (2011) quienes realizaron experimentos de colonización en la playa Mendieta, Reserva Nacional de Paracas, el establecimiento y predominio de *C. chamissoi* sobre los sustratos calcáreos se dio de manera preferente. Asimismo, esto explicaría el hecho de que en el Tratamiento C el cabo de propileno no haya sido un buen sustrato para la propagación de *C. chamissoi*. Para el Tratamiento B se estimó el tiempo de cicatrización de tejido fraccionado de frondas de *C. chamissoi*, a 15 días del inicio del acondicionamiento en sustrato, produciendo brotes primarios. Al día 20 se incrementaron los brotes y aparecieron nuevas ramificaciones en las frondas. En este lapso de tiempo la formación de DFS fue mínima, formándose nuevamente frondas iniciales que permitieron continuar con la siguiente etapa del estudio, cuando se inspeccionó que cada 10 días había un incremento de longitud.

Los resultados ratifican el estudio realizado por Saez, F., D. Yañez y J. Macchiavello (2015), indicándose que el periodo de sellado del tejido dañado fue posterior a 15 días. Con el estudio realizado cicatrización en frondas tetrasporofíticas y gametofíticas femeninas de *C. chamissoi* (Gigartinales, Rhodophyta).

3.2. Crecimiento de *C. chamissoi* “Yuyo”

La evaluación comparativa de crecimiento vegetativo en el presente estudio mostró un promedio entre los tratamientos con diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), para los tratamientos (A), (B) y (P).

Previamente se realizó la prueba de normalidad para los tratamientos, obteniendo como resultado que los datos se encuentran dentro de los parámetros normales. En este caso se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro - Wilk,

Tabla 1. Crecimiento promedio en longitud de fronda (mm.)

TRATAMIENTO	A	B	C	P
DÍA 10	1.4	2.3	-	1.3
DÍA 20	2.3	3.2	-	2.2
DÍA 30	3.0	4.1	-	2.9
DÍA 40	3.9	4.8	-	3.5

Fuente: Elaboración propia.

En el experimento observamos diferencias de crecimiento, donde el tratamiento (B) sobresalió con relación a los tratamientos (A) y del Grupo Control (P). La tasa de crecimiento en general, para los 40 días de cultivo, es mayor (4.8 mm), en comparación a los demás tratamientos, que mostraron crecimientos de 3.9 mm (A) y 3.5 mm (P).

En consecuencia, se llevó a cabo un análisis comparativo en tiempo y crecimiento. A continuación se presenta una tabla con los resultados del análisis de varianza (tabla 2).

Tabla 2. Análisis de varianza a 10, 20, 30 y 40 días

ANÁLISIS DE VARIANZA A 10 DÍAS							
Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	$F_{calc.}$	F_{tablas}		p
					0.05	0.01	
Tratamiento	2	1.4	0.7	3.58	3.06	4.26	0.0013
Error	6	1.2	0.2				
Total	8	2.7					
Coefficiente de Variabilidad	26.2			Promedio			1.7
ANÁLISIS DE VARIANZA A 20 DÍAS							
Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	$F_{calc.}$	F_{tablas}		p
					0.05	0.01	
Tratamiento	2	1.6	0.8	24.65	3.06	4.26	0.0000
Error	6	0.2	0.0				
Total	8	1.7					
Coefficiente de Variabilidad	6.9			Promedio			2.6
ANÁLISIS DE VARIANZA A 30 DÍAS							
Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	$F_{calc.}$	F_{tablas}		p
					0.05	0.01	
Tratamiento	2	2.4	1.2	16.58	3.06	4.26	0.0000
Error	6	0.4	0.1				
Total	8	2.8					
Coefficiente de Variabilidad	7.9			Promedio			3.4
ANÁLISIS DE VARIANZA A 40 DÍAS							
Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	$F_{calc.}$	F_{tablas}		p
					0.05	0.01	
Tratamiento	2	1.7	0.8	8.76	3.06	4.26	0.0000
Error	6	0.6	0.1				
Total	8	2.2					
Coefficiente de Variabilidad	7.4			Promedio			4.2

Fuente: Elaboración propia, basada en el registro de datos de crecimiento en longitud.

Dado que en todos los análisis de varianza se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0.01$), y coeficientes de variabilidad altos ($> 5\%$), se aplicó la prueba de Tukey al 1 %, para establecer las diferencias estadísticas significativas.

A continuación mostramos los resultados de la prueba Tukey, para cada análisis de varianza, ya antes detallado.

Tabla 3. Prueba de Tukey para varianza a 10, 20,30 y 40 días

PRUEBA TUKEY EN 10 DÍAS			
Nro. De Orden	Tratamiento	Rendimiento Promedio	Sig.
1	A	1.44	A
2	B	2.28	b>ap.
3	P	1.43	P
PRUEBA TUKEY EN 20 DÍAS			
Nro. De Orden	Tratamiento	Rendimiento Promedio	Sig.
1	A	2.28	a
2	B	3.15	b
3	P	2.26	a
PRUEBA TUKEY EN 30 DÍAS			
Nro. De Orden	Tratamiento	Rendimiento Promedio	Sig.
1	A	3.05	a
2	B	4.12	b
3	P	3.02	a
PRUEBA TUKEY EN 40 DÍAS			
Nro. De Orden	Tratamiento	Rendimiento Promedio	Sig.
1	A	3.94	a
2	B	4.78	b
3	P	3.81	a

Fuente: Elaboración propia, basada en el registro de datos de crecimiento en longitud.

El mejor crecimiento obtenido en los 40 días de cultivo en laboratorio, fue en el tratamiento (B), con una tasa de crecimiento de 4.78 mm. \pm 0.12 mm./día y cultivada en sustrato artificial (malla de fruta), en comparación al tratamiento (A), en el cual se observó una tasa de crecimiento de 3.94 mm. \pm 0.10 mm. /día, cultivada en valva de almeja; y en el grupo control (P), se observó una tasa de crecimiento diario de 3.70 mm. \pm 0,09 mm. /día (Arbaiza et al. 2015; Bulboa et al. 2013).

Sin embargo, Arbaiza et al. (2015) obtuvieron un valor promedio de crecimiento y desarrollo muy heterogéneo entre las 4 iteraciones experimentales. La talla final fue T1: 2.15 mm, T2: 1.01 mm, T3: 1.13 mm y T4: 0.7 mm., indicando que es muy voluble el crecimiento. Mientras que los resultados obtenidos por Bulboa et al. (2013) registraron variaciones entre 0,2 \pm 0,03 y 3,5 \pm 1,2 mm, en cultivos sobre sustrato natural, y en el sustrato artificial varió entre 0,8 \pm 0,2 y 5,4 \pm 0,1 mm.

3.3. Supervivencia de *C. chamissoi*

El análisis comparativo de supervivencia en las unidades de estudio entre los tratamientos, señala estimaciones promedio por periodo de control.

A los datos de supervivencia obtenidos, se le aplicó un análisis de varianza en el periodo de estudio por tratamiento, que se presenta en la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 4. Análisis de varianza en el periodo de estudio por tratamiento

ANÁLISIS DE VARIANZA A 10 DÍAS								
Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	$F_{calc.}$	F_{tablas}		p	
					0.05	0.01		
Tratamiento	2	1468.7	734.3	4.49	2.43	3.5	0.0000	
Error	6	981.3	163.6					
Total	8	2450.0						
Coeficiente de Variabilidad		40.4	Promedio			31.7		
ANÁLISIS DE VARIANZA A 20 DÍAS								
Fuente de Variación	Grados de Libertad	S.C	Cuadrados Medios	$F_{calc.}$	F_{tablas}		p	
					0.05	0.01		
Tratamiento	2	3066.9	1533.4	16.24	2.43	3.5	0.0000	
Error	6	566.7	94.4					
Total	8	3633.6						
Coeficiente de Variabilidad		38.7	Promedio			25.1		
ANÁLISIS DE VARIANZA A 30 DÍAS								
Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	$F_{calc.}$	F_{tablas}		p	
					0.05	0.01		
Tratamiento	2	2038.6	1019.3	16.15	2.43	3.5	0.0156	
Error	6	378.7	63.1					
Total	8	2417.2						
Coeficiente de Variabilidad		38.2	Promedio			20.8		
ANÁLISIS DE VARIANZA A 40 DÍAS								
Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	$F_{calc.}$	F_{tablas}		p	
					0.05	0.01		
Tratamiento	2	1851.9	925.9	14.20	2.43	3.5	0.0066	
Error	6	391.3	65.2					
Total	8	2243.2						
Coeficiente de Variabilidad		41.1	Promedio			19.7		

Fuente: Elaboración propia, basada en el registro de supervivencia.

A los resultados del análisis de varianzas, con respecto al tratamiento y tiempo, se le aplicó respectivamente la prueba Tukey.

Tabla 5. Prueba de Tukey para el anterior análisis de varianza (tabla 4)

PRUEBA TUKEY EN 10 DÍAS			
Nro. De Orden	Tratamiento	Rendimiento Promedio	Sig.
1	A	49.667	a
2	B	21.333	b
3	P	24.00	b
PRUEBA TUKEY EN 20 DÍAS			
Nro. De Orden	Tratamiento	Rendimiento Promedio	Sig.
1	A	32.33	a
2	B	21.00	b
3	P	22.00	b
PRUEBA TUKEY EN 30 DÍAS			
Nro. De Orden	Tratamiento	Rendimiento Promedio	Sig.
1	A	23.33	a
2	B	20.00	b
3	P	19.00	b
PRUEBA TUKEY EN 40 DÍAS			
Nro. De Orden	Tratamiento	Rendimiento Promedio	Sig.
1	A	22.00	a
2	B	18.66	b
3	P	18.33	b

Fuente: Elaboración propia, basada en el registro de supervivencia.

Y se obtuvieron los siguientes resultados: Para el tratamiento A, se calculó en los primeros 10 días un promedio de 49 ejemplares, El día 20 el promedio rodeó un valor aproximado de 32 ejemplares. El día 30 se promedió un valor de 23 ejemplares. Y el día 40 se obtuvo un valor promedio de 22 ejemplares.

En cuanto al tratamiento B, precisamos que pasados los 10 días se obtuvo un valor promedio de 21 ejemplares, El día 20 el resultado promedio fue de 21 ejemplares; el día 30 su valor promedio resultante fue 20. Y el día 40 se anotó un resultado promedio de 19 ejemplares.

Para el tratamiento P, a los 10 días se obtuvo un valor aproximado de 21 ejemplares, El día 20 registró 21 ejemplares; el día 30 se indicó un valor promedio de 20 ejemplares. Y el día 40 se mostró un valor promedio de 18 ejemplares, observando una tendencia descendente, lo cual se especifica a continuación.

En este estudio se reconocieron, en los tratamientos (B) y (P), elevadas tasas de supervivencia, comparadas con el tratamiento (A), observándose en los primeros 20 días de cultivo una notable diferencia en relación a los tratamientos B y P, lo que reflejaría una alta densidad de discos de fijación secundaria en el tratamiento (A). Estos resultados evidencian que la supervivencia promedio para el tratamiento (A) es de 74.39 % y para los tratamientos (B) y (P) es de 85.75 %. Con relación a lo anterior, Macchiavello et al. (2013) también reportaron que las altas tasas de supervivencia de *C. chamissoi*, tanto en sustratos naturales como artificiales, se debe a que los DFS se van formando continuamente, lo que promueve la incorporación de juveniles y aumenta el anclaje de las algas en crecimiento sobre los sustratos.

Por otro lado, Bulboa et al. (2013) describieron que las tasas de supervivencia de DFS, después de 40 días, variaron entre 60 ± 12 y 100 %. En tallos unidos en sustrato natural, los valores oscilaron entre 89 ± 3 y 98 ± 3 % para sustrato artificial; sin embargo, no se puede atribuir que la supervivencia dependió directamente del tipo de sustrato utilizado, considerando que en cada tratamiento se utilizó sustratos distintos, además se trabajó en condiciones controladas, lo que es muy distinto de las condiciones naturales. Por lo que el mayor densidad de DFS en el tratamiento A puede estar promovido, no solo por el propio sustrato utilizado (valvas de almejas), sino por la posible presencia en el mismo de micronutrientes trazas (Bishop, 2011). Asimismo, Pariona y Gil-Kodaka (2011) observaron que la *C. chamissoi* crece de mejor manera en sustratos calcáreos, como en este caso las valvas de almejas.

4. Conclusiones y recomendaciones

Se determinó que la mejor tasa de crecimiento obtenido en los 40 días de cultivo, fue en el tratamiento (B), con un valor de $4,78 \text{ mm.} \pm 0.12 \text{ mm. /día}$, el mismo que fue cultivado en sustrato artificial (malla de fruta), a partir de algas fragmentadas.

La supervivencia más alta fue en el tratamiento (B) y (P) de 85.75 % ambos y de 74.39 % en el tratamiento (A).

También se determinó que el uso de cabo de propileno no permite el desarrollo de discos de fijación secundaria, por lo que no se recomienda para su uso en cultivo de *C. chamissoi*.

En relación a lo concluido, se recomienda realizar un estudio sobre el cultivo de la *C. chamissoi*, mediante la macro fragmentación de frondas in vitro. Asimismo, profundizar trabajos de investigación relacionados a los inductores en sustratos artificiales y su aplicación en el cultivo de *C. chamissoi*.

También se propone promover el escalamiento de experiencias similares a este estudio, con el objetivo de dar valor agregado a las algas rojas, considerando su potencial reproductivo y factibilidad de cultivo. Realizar trabajos de investigación donde se incluyan variables económicas, que permitan determinar los índices de rentabilidad de los cultivos marinos.

Referencias

- Alveal, K. R. I. S. L. E. R. (2001). Estrategias reproductivas de Rhodophyta y sus nexos con la biodiversidad. Sustentabilidad de la biodiversidad. Un problema actual: bases científico-técnicas. *Teorizaciones y proyecciones*, 367-388.
- Arbaiza, S., (2016). *Viabilidad reproductiva para el cultivo de Chondracanthus chamissoi proveniente de tres poblaciones del litoral Peruano*, p. 1-114. Lima, Perú.
- Arbaiza, S., Gil, P. y Arakaki, N. (2015). *Fijación de Carposporas y formación de discos de fijación secundaria de Chondracanthus chamissoi "yuyo" (Paiján, Perú) en condiciones Semi Controladas de Laboratorio 1(1)*, 1.
- Arbaiza, S., Gil-Kodaka, P., Arakaki, N. y Alveal, K. (2019). Primeros estadios de cultivo a partir de carpósporas de *Chondracanthus chamissoi* de tres localidades de la costa peruana. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 54(2), 204-213.
- Bishop, K. (2011). *The Effect of Substrate Properties on the Attachment and Reproduction of Diatoms*. [Seniors dissertation, William & Mary University]. <https://bit.ly/3lTZ4fF>
- Bulboa, C., & Macchiavello, J. (2006). Cultivation of Cystocarpic, Tetrasporic and Vegetative Fronds of *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales) on Ropes at two Localities in Northern Chile. *Investigaciones Marinas* 34, 151-154.

- Bulboa, C., Macchiavello, J., Oliveira, E. y Fonck, E. (2005). First Attempt to Cultivate the Carrageenan Producing Seaweed *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta; Gigartinales) in Northern Chile. *Aquaculture Research* 36, 1069–1074.
- Bulboa, C., Veliz, K., Saez, F. et al. (2013). A New Method for Cultivation of the Carragenophyte and Adible Red Seaweed *Chondracanthus chamissoi* Based on Secondary Attachment Disc: Development Inoutdoor Tanks. *Aquaculture Research* 94, 410-411.
- Macchiavello, J., Bulboa, C., & Edding, M. (2003). Vegetative Propagation and Spore Recruitment in the Carrageenophyte *Chondracanthus chamissoi* (Rhodophyta, Gigartinales) in northern Chile. *Phycol. Res.*, 51, 45-50.
- Macchiavello, J., Bulboa, C., Sepúlveda, C. et al. (2013). Alternativas tecnológicas para el cultivo de *Chondracanthus chamissoi* en la zona norte de Chile a partir de discos de fijación secundaria. *Manual de Cultivo de Chondracanthus chamissoi (Chicorea de mar)*. Fondef-HUAM AQ081-1028.
- Pariona, E. y Gil-Kodaka, P. (2011). *Colonización de Chondracanthus chamissoi (Rhodophyta, Gigartinales) sobre sustratos calcáreos en Playa Mendieta, 59 Reserva Nacional de Paracas*. [Revista científica] doi: 10.21704/ac.v76i2.854, lima.
- Saez, F.; Macchiavello, J.; Fonck, E. y Bulboa, C. (2008). The Role of the Secondary Attachment Disc in the Vegetative Propagation of *Chondracanthus chamissoi* (Gigartinales, Rhodophyta). *Aquatic Botany* 89, 63–65..

Physicochemical properties and microbial group behavior of postharvest peruvian cocoa bean (*Theobroma cacao* L.)

Propiedades fisicoquímicas y comportamiento de grupos microbianos en la poscosecha del cacao peruano (Theobroma cacao L.)

Eduardo Salazar¹, Roxana Valenzuela², Margarita Aguilar³, Natali Aranda⁴, Alejandrina Sotelo⁵, Gabriela Chire⁶, Milber Ureña⁷

Abstract

Cocoa is used in the manufacturing of different products. Fermenting microorganisms such as yeast and bacteria use the high nutrient content of cocoa. This research evaluated physicochemical properties and microbial group behavior of fresh cocoa bean and four treatments to compare among them (A, A-farmer, B, and B-farmer). Moisture content, mold and yeast count, and *Salmonella* were determined in fresh cocoa beans and treatments. The results of fresh cocoa beans were moisture content of 56.30 ± 0.02 % and microbiological count below control. Treatments results were moisture content of 3.10 ± 0.02 %, 10.30 ± 0.20 %, 4.80 ± 0.00 %, and 11.40 ± 0.20 % ($p \leq 0.05$), mold and yeast count were statistically similar ($p > 0.05$). *Salmonella* was not detected in any of the treatments. These findings indicate that regardless of post-harvest process, there is no fungal contamination in cocoa when carrying out good manufacturing practices.

Keywords

Food safety; fungal contamination; microorganisms; Peru; sun-drying.

Resumen

El cacao es utilizado en la elaboración de diversos productos. En el procesamiento, los microorganismos fermentadores como levaduras y bacterias aprovechan el alto contenido de los nutrientes del cacao. La investigación evaluó las propiedades fisicoquímicas y el comportamiento de grupos microbianos del cacao en baba, sometido a cuatro tratamientos (A, A-agricultor, B y B-agricultor). Al cacao en baba y a los tratamientos se les determinaron la humedad, el recuento de mohos y levaduras y la detección de *Salmonella*. Los resultados de la calidad del cacao en baba fueron: $56,30 \pm 0,02$ % de humedad y la carga microbiana estuvo bajo requisitos. Los resultados de los tratamientos fueron: la humedad $3,10 \pm 0,02$ %; $10,30 \pm 0,20$ %; $4,80 \pm 0,00$ %; y $11,40 \pm 0,20$ % ($p \leq 0,05$), respectivamente. Los recuentos de mohos y levaduras fueron estadísticamente similares ($p > 0,05$). En ningún tratamiento se detectó la presencia de *Salmonella*. Estos hallazgos indican que, independientemente del proceso de poscosecha evaluado, no existió una contaminación por hongos en el cacao, derivado de las buenas prácticas de manufactura.

Palabras clave

Contaminación por hongos; inocuidad; microorganismos; Perú; secado-solar.

- 1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. [eduardo.fmv08@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5065-928X>]
- 2 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. [chemrvp28@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5738-7996>]
- 3 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. [margarita0908@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-9088-9453>]
- 4 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. [nataliarandavillalobos@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1016-0230>]
- 5 Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. [asotelo@lamolina.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-6992-4821>]
- 6 Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. [gchire@lamolina.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-7422-7636>]
- 7 Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. [moupl@lamolina.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-6817-2373>]

1. Introduction

Cocoa (*Theobroma cacao* L.) is an important botanical species in many developing countries such as Africa, Asia, and Latin America. Cocoa used for chocolate production is treated with a fermentation process for a variable period. During this stage, the microorganisms contribute to the fermentation and consume the nutrients of the mucilaginous pulp surrounding the fresh cocoa bean. Additionally, a series of biochemical reactions occur in the beans due to the increase in temperature, which leads to the formation of aroma and flavor precursors. Subsequently, the fresh cocoa beans are dried, a process that decreases the loss of volatile organic acids and oxidizes polyphenols. The overall result has a great impact on the sensory, physical, and chemical quality of the product (Contreras et al., 2004).

Another treatment of cocoa in the postharvest is the direct sun-drying of unfermented beans. The beans in this type of drying process do not undergo the changes produced by microbial action and temperature increment, and polyphenols are preserved in greater proportion (Chavez-Rivera, 2013; Lippi, 2013). The dried cocoa beans without fermentation are also used for the extraction of cocoa butter with a high yield (Asep et al., 2008).

The pulp surrounding the fresh cocoa beans contains about 80-90 % of water, 10-15 % of sugars (mainly sucrose) and between 0.5 and 0.7 % of proteins. Therefore, the pulp source is the second most important macronutrient (Sarbu and Csutak, 2019). Also, the water activity (a_w) of the pulp ranges from 0.98 to 0.99 (Copetti et al., 2011a). These conditions favor the spontaneous growing of fermentation microorganisms, such as lactic acid and acetic acid bacteria, which contribute to the quality of the final product (Mozzi et al., 2013; Copetti et al., 2014). Potentially pathogenic microorganisms can develop too, such as *Aspergillus*, *Penicillium* and *Fusarium*. These molds constitute a risk to public health due to their capacity to produce toxins (Copetti et al., 2011b, Chire et al., 2014). Cocoa can also be a source of chocolate contamination with bacteria such as *Salmonella* (Nascimento et al., 2013), because of poor hygiene practices during cocoa bean processing (Cordier, 2000; Burndred, 2009). High microbiological levels and the presence of *Salmonella* are a recognized and reported hazard (Burndred, 2009; Werber et al., 2005). Dried cocoa beans and chocolate have low water activity (a_w) (Copetti et al., 2011b) and are high in fat content (Asep et al., 2008), characteristics that contribute to the viability of *Salmonella* for prolonged periods (Komitopoulou and Peñaloza, 2009). Moreover, it has been reported that a high fat content protects the bacteria in the digestive tract, which reduces the infective dose to less than one colony forming unit per gram (Scott et al., 2009).

Therefore, it is necessary to know the physicochemical properties and microbial group behavior of different types of post-harvest process of cocoa beans.

2. Methodology

Sample Treatment

Twenty-three cocoa pods with the absence of fissures, bean exposure or fungus growth were selected from a total of cocoa pods during September 2016 (Laboratorio de Salud Pública y Salud Ambiental, Facultad de Medicina Veterinaria, UNMSM). These cocoa pods were cut carefully with a knife to remove fresh cocoa beans by hand. The beans were separated from each other and the average net weight (2120.5 g) of the seeds was registered. Subsequently, half

of the weight of cocoa beans were subjected to treatment A and the complementary part to treatment B: Treatment A consisted in the fermentation and drying of the beans in a food dehydrator (artificial drying), while Treatment B only consisted in sun-drying of the beans between 28 to 33 °C. These treatments were performed to obtain cocoa beans used for two different purposes of production: chocolate (Treatment A) and medical products (Treatment B).

Processing of cocoa for chocolate production (Treatment A and A-farmer): Treatment A consisted of two stage: Fresh beans fermentation and then beans drying. For the first stage, a square wooden fermenter box was used (Portillo et al., 2005, Aprotosoiaie et al., 2016). This fermenter box has a content capacity of approximately 2 kg (Contreras et al., 2004) and perforations of 0.4 cm on each side and at the bottom. On average, 62 % of fresh cocoa beans was kept in this box for seven days at room temperature (between 20 to 25 °C), covered by a thick cloth to reduce contact with the air. On days 2, 4 and 7, the weight of the bean mass was registered, and temperature was measured with an infrared thermometer. These beans were mixed, so that the lower part could come to the surface, to standardize temperature and aerate the mass (it was carried out in a laboratory in Lima). Treatment A-farmer was carried out as above-mentioned procedure at the cocoa farm in San Ignacio (Cajamarca). The drying stage was performed on day 8, the bean mass was placed in a food dehydrator (Blanik BDA020) at 40 °C (Zahouli et al., 2010). The bean mass total weight was registered at day fourteen.

Processing of cocoa for medicinal products (Treatment B and B-farmer): Treatment B was performed by sun-drying (Aprotosoiaie, 2016). The fresh cocoa beans were spread out on a mesh and set in a draft free place. There they received sunlight during seven days at a temperature that was lower than 35 °C (between 28 to 33 °C). The beans were mixed and spread out every two hours from 8:00 to 16:00 every day. At the end of the day the total weight was registered (it was carried out in a laboratory in Lima). Treatment B-farmer was carried out as above procedure at the cocoa farm in San Ignacio Farm (Cajamarca) to verify the quality.

Fresh cocoa beans were subjected to treatments: A, A-farmer, B and B-farmer. To assess results, the following microbiological criteria were used: Peruvian health standard RM No. 591 (MINSAs, 2008), and the results of Papalexandratou et al. (2013), Chaves-Lopez et al. (2014), Ardhana and Fleet (2003); and Sangronis et al. (2014).

Analysis methods:

The native cocoa from the province of San Ignacio, located in the department of Cajamarca (Peru) at 1350 meters above sea level, was evaluated using the following methods:

The proximal analysis of cocoa beans was done by triplicate according to AOAC (2016) methods. The analysis included moisture (AOAC 931.04), ash (AOAC 972.15), crude protein (AOAC 970.22), and crude fat (AOAC 920.75^a) (AOAC, 2016). Carbohydrates was determined by difference.

The physicochemical analysis of cacao beans was done by triplicate according to AOAC (2016) methods. The analysis included the determination of water activity (Aqualab series 4TEV DUO instrument, Decagon, USA at 25 ± 0.1 °C) and pH (AOAC 970.21).

The microbiological analysis of cacao beans was done by duplicates according to ICM-SF (2000) methods. The analysis included the total aerobic mesophilic count (TAM) employing Plate Count Agar (PCA), mold and yeast count on Potato Dextrose Agar (PDA) and detection of *Salmonella* in Salmonella-Shigella Agar.

Statistical analysis

Physicochemical and microbiological analysis were performed by triplicate and duplicate per experimental unit, respectively. Response values were expressed as mean \pm standard deviation for each experimental unit. A completely randomized design ($p \leq 0.05$) was applied to determine the difference between treatments, using variance analysis (ANOVA). The STATISGRAPHICS 5.0 PLUS® program was used for the statistical analysis.

3. Results

Proximate composition of fresh cocoa beans is shown in *Table 1*, the amount of water was $56,30 \pm 0.02$ %. The water content of the beans was like a study that states that the initial moisture content was 55.49 ± 0.14 % (Castro et al., 2016). Treatment A consisted of two processes that had a duration of seven days each one, it had a yield in weight 70.20 ± 11.60 % occurred during fermentation phase and 33.15 ± 2.62 % in dehydrator drying at 40 °C, in this case the conditions were regulated, reached an average moisture of 3.10 ± 0.02 %. Treatment B had a yield in weight of 37.45 ± 11.95 % in sun-drying for seven days and reached 4.81 ± 0.01 % as the average final moisture, this was due to the beans were stirred, spread out and also depends on the environmental conditions (30.84 ± 2.35 °C). It is well known that the yield of weight varies widely due to environmental conditions such as temperature and relative humidity.

Table 1. a_w , pH and proximate analysis values of cocoa beans

Cocoa Beans	a_w	pH	g/100g	Dried Base (g/100g)			
			Moisture	Ash	Crude protein	Crude fat	Total carbohydrates
Fresh cocoa beans	$0.98 \pm 0.00^*$	$5.04 \pm 0.01^*$	$56.30 \pm 0.02^*$	$3.91 \pm 0.08^*$	$17.59 \pm 0.07^*$	$34.84 \pm 0.06^*$	$43.65 \pm 0.07^*$
Treatment A	$0.41 \pm 0.02^{**}$	$5.21 \pm 0.01^{b*}$	$3.10 \pm 0.02^{**}$				
Treatment A-farmer	$0.70 \pm 0.01^{b*}$	$5.02 \pm 0.01^{a*}$	$10.30 \pm 0.20^{c*}$	$4.50 \pm 0.08^{a*}$	$15.80 \pm 0.18^{a*}$	$47.70^{a*} \pm 0.04$	$32.00 \pm 0.26^{b*}$
Treatment B	$0.67 \pm 0.01^{b*}$	$5.22 \pm 0.01^{b*}$	$4.81 \pm 0.01^{b*}$				
Treatment B-farmer	$0.79 \pm 0.01^{c*}$	$5.49 \pm 0.01^{c*}$	$11.40 \pm 0.20^{d*}$	$4.40 \pm 0.06^{a*}$	$15.70 \pm 0.03^{a*}$	$48.90^{b*} \pm 0.02$	$31.00 \pm 0.24^{a*}$

*The values are expressed as mean \pm standard deviation (n = 3)

Portillo et al. (2005), indicate that after a bean drying process, the percentage of moisture should be reduced to 6 or 8 %. The moisture content of the cocoa bean after drying is a quality factor that determines a proper packaging, transport, and storage time. These values were like the moisture content reported by Portillo et al. (2005) and were below the limit of 7.5 %, established by Peruvian regulations (MINSA, 2008; INACAL, 2016). Also, *Table 1* shows the values of a_w , pH and proximate analysis of cocoa beans subjected to treatments A, A-farmer, B and B-farmer. It is observed that the fresh cocoa beans had a high a_w values that were similar to those found by Copetti et al. (2011a), after each treatment, a_w decreased more in treatment A than in treatment B, A-farmer and B-farmer ($p \leq 0.05$). pH values of cacao beans increased in

treatment A, B and B-farmer ($p \leq 0.05$). Crude fat was higher for treatment B than treatment A ($p \leq 0.05$), total carbohydrates decreased ($p \leq 0.05$). Crude protein and ash were similar ($p > 0.05$). It was considered only determined full proximal analysis for treatment A-farmer and B-farmer because of significant characterization. Microbiological analysis (Table 2) for all treatment were statistically similar ($p > 0.05$), the largest reduction in TAM and yeast population were obtained after postharvest, whereas *Salmonella* was absent in all treatments.

Table 2. Microbiological analysis of cocoa beans

Microorganism	Fresh cocoa beans	Cocoa Beans			
		A	A-farmer	B	B-farmer
Total aerobic mesophilic (TAM)**	5.61 ± 2.04*	3.79 ± 0.17 ^{a*}	4.46 ± 1.60 ^{a*}	2.49 ± 0.21 ^{a*}	3.28 ± 0.70 ^{a*}
Mold**	2.83 ± 2.59*	1.23 ± 0.32 ^{a*}	1.45 ± 0.64 ^{a*}	1.35 ± 0.49 ^{a*}	1.15 ± 0.21 ^{a*}
Yeast**	4.20 ± 0.23*	1.81 ± 2.42 ^{a*}	2.59 ± 2.26 ^{a*}	2.39 ± 0.55 ^{a*}	2.86 ± 1.16 ^{a*}
<i>Salmonella</i>	Absence in 25 g				

*The values are expressed as mean ± standard deviation (n = 2). (**) results express in log CFU/g

4. Discussion

Three important components were analyzed: crude protein, crude fat and total carbohydrate content in fresh cocoa beans. Their respective values on dry base were 17.59 %, 34.84 % and 43.65 % (Table 1). The presence and quantities of these components make cocoa beans a suitable substrate for a wide range of microorganisms, including pathogens, that can obtain energy and nutrients. Furthermore, Gram (-) bacteria, such as *Enterobacteriaceae*, *E. coli* and *Salmonella*, may satisfy more easily their nutritional requirements based on nutrients available in cocoa, compared to Gram (+) which are more demanding (Jay, 2000).

The cocoa farmer prefers to work with Treatment B, because it completes the process in a shorter time (6 to 7 days) and they can obtain dried cocoa beans with an increased of around 2 % higher fat yield (48.90 ± 0.02 %) compared to treatment A (47.70 ± 0.04 %), this value is lower than the one reported by Loo (2020). Both treatments, A and B, experienced weight loss due to release of water, from initial 100 % fresh cocoa beans by weight to 33.15 ± 2.62 % and 37.45 ± 11.95 % dried cocoa beans, respectively. Treatment B was a non-fermentation process, accompanied by the risk that the lack of organic acids would cause the growth of ochratoxin A-producing fungi. It should be pointed out that chocolatiers of fine flavor cocoa require fermented cocoa beans, so the postharvest process takes longer time (14 to 15 days) to ensure the moisture content comply the INACAL (2016) and INEN (2006) Standards.

The cocoa beans of treatments A and B, reached moisture contents of 3.10 ± 0.02 % and 4.80 ± 0.00 %; with a_w of 0.41 ± 0.02 and 0.67 ± 0.01 , respectively. However, treatments A-farmer and B-farmer performed by the cocoa farmer in the field had higher moisture contents of 10.30 ± 0.20 % and 11.40 ± 0.20 %, respectively ($p \leq 0.05$); with higher a_w values of 0.70 ± 0.01 and 0.79 ± 0.01 ($p \leq 0.05$). It is also known that the final moisture is related to the a_w by a sorption isotherm of a food (Belitz et al., 2009). The solar drying depends on the environmental climatic conditions, the heat generated by the solar rays was used to dry the cocoa beans slowly and

gradually, which were scattered and removed during the hours of sun, so that the cocoa beans by treatment B-farmer, had a different moisture and a_w ($p \leq 0.05$) than cocoa beans subjected to artificial drying (treatment A and A-farmer) where the heat was controlled at 40 °C for seven consecutive days, having lower moisture and a_w . Furthermore, a_w is related to the survival of pathogenic microorganisms, such as *Staphylococcus aureus*, *Clostridium botulinum*, *Salmonella* spp. These microorganisms develop in foods with a_w values that range from 0.88 to 0.99. Therefore, the results of the microbiological analysis can be attributed to the low level of a_w such as in treatment A. The pH value of the fresh cocoa beans was close to the average acidity due to the pulp that covers the fresh cocoa beans is quite acidic (pH 5.04 ± 0.01). Cocoa beans subjected to treatment B-farmer were higher pH (5.49 ± 0.01) than both treatments B and A; and A-farmer with lower pH (5.02 ± 0.01) because fermentation process produce organic acids (low pH) and drying process release organic acids (higher pH) (Afoakwa et al., 2008; Zambrano et al., 2010). pH also determines the fermentation status, biochemical reactions and tastes of the cocoa beans (Afoakwa et al., 2014), in these terms treatment A and A-farmer were well-fermented cocoa beans. Zambrano et al. (2010) studied the drying process of two cocoa bean types. They did not find marked pH variations (4.6 and 5.1) in dried cocoa beans; however, the pH with treatment B and that of B-farmer was 5.22 and 5.49, respectively, and were statistically different ($p \leq 0.05$).

Fresh cocoa beans have the values for TAM and yeast, compared to the four treatments, exceeding 4.00 log CFU/g (Table 2). This is due to the fact that the beans inside the cocoa pod are sterile when it is cut and the beans exposed to the environment, the microorganisms take advantage of the high sugar and moisture content of the fresh cocoa beans to initiate their development (Aprotosoiaie et al., 2016; Fowler and Coutel, 2017). According to Peruvian health standard RM No. 591 (MINSA, 2008) states that semi-processed fresh fruits and vegetables, as is the case with cocoa pods that were cut to remove the fresh cocoa beans and before postharvest process, the TAM count must be maximum 4.00 log CFU/g. Papalexandratou et al. (2013), using a culture-dependent technique, carried out the microbial growth of fresh cocoa beans, developed in fermenter boxes from Malaysia and made the following findings: an initial total bacterial population of 6.50 log CFU/g reaching a maximum of 8.90 log CFU/g during the cocoa fermentation process an initial yeast count of 5.30 log CFU/g up to a maximum of 7.00 log CFU/g during fermentation. Chaves-Lopez (2014), reported microbial temporal succession during cocoa fermentation, Ardhana and Fleet (2003) an initial yeast loads of 4.00 log CFU/g reaching a maximum of 8.00 log CFU/g during the cocoa fermentation. TAM and yeast load of fresh cocoa beans of this study was 5.61 ± 2.04 log CFU/g and 4.20 ± 0.23 log CFU/g, values which were close to those found in related studies. Fungal contribution to fermentation is restricted, an initial mold count of 2.00 log CFU/g reaching a maximum of 6.00 log CFU/g were found by Ardhana and Fleet (2003). A mold count of 2.83 ± 2.59 log CFU/g was found in this study (high variation); this might be due to cross-contamination. *Salmonella* was absence in fresh cocoa bean.

TAM counts were lower in treatment B (2.49 ± 0.21 log CFU/g) and B-farmer (3.28 ± 0.70 log CFU/g), as compared to those that underwent treatment A (3.79 ± 0.17 log CFU/g) and A-farmer (4.46 ± 1.60 log CFU/g), however there were no significant differences between them ($p > 0.05$). This result can be attributed to the fact that cocoa beans in treatment B and B-farmer were exposed to direct sunlight that may exert a harmful effect on the bacteria (Fonseca and Tabares, 2011). The population of molds was lower in all treatments A, A-farmer, B and B-farmer, and were no significant differences between them ($p > 0.05$). Peruvian health standard

RM No. 591 (MINSa, 2008) does not specify limits for TAM in dried, dehydrated or lyophilized fruits and vegetables. However, for other semi-processed fruits and vegetables, this standard recommends TAM counts below 4.00 log CFU/g. Husk of the cocoa samples for infusions TAM counts were from 4.55 log CFU/g to 3.60 log CFU (Sangronis et al., 2014), the authors stated the Venezuelan standard was a maximum of 4.00 log CFU/g TAM. In this sense, cocoa beans from treatments A, A-farmer, B and B-farmer complied with these criteria. The maximum allowed limit for mold is 2.00 log CFU/g in dried, dehydrated or lyophilized fruits and vegetables (MINSa, 2008). Sangroni et al. (2014) recorded 1.00 log CFU/g mold for husk of the cocoa samples and state the Venezuelan standard was a maximum of 3.00 log CFU/g of mold; and in another study of Colombian fermented food as cocoa beans (Ardhana and Fleet, 2003; Chaves-López et al., 2014) a mold count 4.00 log CFU/g at the end of the postharvest process was determined, therefore, treatment A, A-farmer, B; and B-farmer represented a good manufacturing practices.

In addition, the maximum allowed limit for yeast is 2.00 log CFU/g in dried, dehydrated or lyophilized fruits and vegetables (MINSa, 2008). Sangronis et al. (2014) recorded 1.00 log CFU/g for husk of the cocoa samples and state the Venezuelan standard of 3.00 log CFU/g of yeast; Papalexandratou et al. (2013), found a yeast count of 2.0 - 2.5 log CFU/g at the end of the cocoa fermentation process and Chaves-López et al. (2014) a yeast count of 4.00 log CFU/g by Ardhanana and Fleet (2003). Four treatments A, A-farmer, B and B-farmer were no significant different between them ($p > 0.05$) regarding the microbiological analysis performed. On the other hand, there was not *Salmonella* presence in any of the treatments. This could be attributed to the fact that this bacterium belongs to the gastrointestinal tract and would be more involved in cross-contamination with gastrointestinal contents due to poor hygiene practices (Nascimento et al., 2013). Since this can occur in the postharvest of cocoa bean sites, some factories wash and dried cocoa beans immediately to ensure microbiological quality before being processed as cocoa derivatives and the subsequent processing of chocolates (Belitz et al., 2009). Finally, due to application of good manufacturing practices, no fungal contamination was found in the cocoa with treatment A, A-farmer, treatment B, and B-farmer in the post-harvest process.

5. Conclusions and recommendations

The physicochemical quality of samples of the native cultivar of cocoa from San Ignacio (Cajamarca, Peru) was evaluated regarding their moisture (56.30 ± 0.02 %), water activity (0.98 ± 0.00), pH (5.04 ± 0.01) and the microbiological count, which complied the national standard. Fresh cocoa beans were processed in four treatments: A, A-farmer, B and B-farmer and the characterization of these cocoa beans in moisture, water activity (a_w) and pH resulted statistically different ($p \leq 0.05$). The microbiological quality of fresh cocoa beans as raw material should be known. Treatments A, A-farmer, B, and B-farmer had different temperatures; in treatments B and B-farmer, the cocoa was sun-dried at a maximum of 35°C and in treatments A and A-farmer it was artificially dried at 40°C, which showed that the values that are suitable for human consumption (TAM, mold and yeast), including treatment A-farmer with high values in TAM and mold count. *Salmonella* was absent in all treatments ($p > 0.05$).

Ongoing microbiological monitoring must also be done in any type of the postharvest to detect the presence of *Salmonella* and molds. As the cocoa pods heal, the cocoa beans will remain healthy despite the post-harvest process used; thus, the key is to maintain good agricultural practices in plantation.

Acknowledgments: We would like to thank Mr. Angel López and the cacao farmers from San Ignacio in Cajamarca for the materials provided and to Dr. Hassan Firoozmand for scientific communications corrections.

References

- Afoakwa, E.O.; Budu, A.S.; Mensah-Brown, H. et al. (2014). Changes in Biochemical and Physico-chemical Qualities During Drying of Pulp Preconditioned and Fermented Cocoa (*Theobroma cacao*) Beans. *Journal of Nutritional Health & Food Science* 2(3), 1–8. doi: 10.15226/jnhfs.2014.00121
- Afoakwa, E.O.; Paterson, A.; Fowler, M. et al. (2008). Flavor Formation and Character in Cocoa and Chocolate: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 48(9), 840–857. doi: 10.1080/10408390701719272.
- Aprotosoiaie, A. C.; Luca, S. V.; Miron, A. (2016). Flavor Chemistry of Cocoa and Cocoa Products – An Overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 15, 73-91. doi: 10.1111/1541-4337.12180
- Ardhana, M. M., Fleet, G.H. (2003). The Microbial Ecology of Cocoa Bean Fermentations in Indonesia. *International Journal of Food Microbiology* 86, 87-99. doi: 10.1016/S0168-1605(03)00081-3
- Asep, E. K.; Jinap, S.; Tan, T. J. et al. (2008). The Effect of Particle Size, Fermentation and Roasting of Cacao Nibs on Supercritical Fluid Extraction of Cacao Butter. *Journal Food Engineering* 85, 450-458. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.08.008
- AOAC. (2016). Official Methods of Analysis of the AOAC International. In William Horwitz and George W. Latimer, Jr (eds.). *Method 931.04, 972.15, 970.22, 920.75a, 970.21*. (20° ed.). Vol. II. . Maryland, USA.
- Belitz, H. D.; Grosch, W.; Schieberle, P. (2009). *Food Chemistry*. (4° revised and extended edition). Springer.
- Burdred, F. (2009). Food Safety in Chocolate Manufacture and Processing. In: Beckett, S. (eds). *Industrial Chocolate Manufacture and Use*. Wiley-Blackwell. York, United Kingdom, pp. 530-550. doi: 10.1002/9781444301588
- Castro, M. D. R.; Hernández, J. A.; Marcilla, S. et al. (2016). Efecto del contenido de grasa en la concentración de polifenoles y capacidad antioxidante de *Theobroma cacao* L. "CACAO". *Ciencia e Investigación* 19(1), 19-23.
- Contreras, C. L.; Ortiz de Bertorelli, L.; Graziani de Fariñas, L. et al. (2004). Cocoa Fermenters Used by Farmers of Cumboto, Venezuela. *Agronomía tropical* 54(2), 219-232.
- Copetti, M. V.; Iamanaka, B.T.; Frisvad, J.C. et al. (2011a). *Aflatoxigenic Fungi and Aflatoxin in Cacao*. *International Journal of Food Microbiology* 148, 141-144. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2011.05.020
- Copetti, M. V.; Iamanaka, B. T.; Frisvad, J.C. et al. (2011b). Mycobiota of Cacao: From farm to Chocolate. *Food Microbiology* 28, 1499-1504. doi: 10.1016/j.fm.2011.08.005
- Copetti, M. V.; Iamanaka, B.T.; Pitt, J. I. et al. (2014). *Fungi and Mycotoxins in cacao: From farm to chocolate*. *International Journal of Food Microbiology* 178, 13-20. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2014.02.023
- Cordier, J. L. (2000). Sugars, Honey, Cacao, Chocolate and Confectionery Products. In: Lund BM, Baird-Parker Tc, Gould GW (eds.). *The Microbiological Safety and Quality of Food 1*, 941-959.
- Chaves-López, C.; Serio, A.; Grande-Tovar, C. D. et al. (2014). Traditional Fermented Foods and Beverages from a Microbiological and Nutritional Perspective: The Colombian Heritage. *Comprehensive review in food science and food safety* 13, 1031-1048. doi: 10.1111/1541-4337.12098
- Chávez-Rivera, R. E.; Ordoñez-Gómez, E.S. (2013). *Polifenoles totales, antocianinas y capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) durante el procesamiento de licor y polvo de cacao*. *ECl-Perú*, 10(1), 42-50.
- Chire, G. C.; Valdivia, R. A.; Ureña, M. O. (2014). *Ocratoxin A in Cocoa and Derivatives*. *Preventive Measures*. *Ciencia e Investigación* 17(1), 9-15.
- Fonseca, M. J.; Tavares, F. (2011). The Bactericidal Effect of Sunlight. *The American Biology Teacher* 73(9), 548-552. doi: 10.1525/abt.2011.73.9.8

- Fowler, M.S.; Coutel, F. (2017). Cocoa Beans: From Tree to Factory. In: Beckett, S., Fowler, MS., Ziegler, GR. (eds). *Beckett's Industrial Chocolate Manufacture and Use*. (5^o. ed.), p.18. Wiley-Blackwell. York, United Kingdom.
- Icmsf (2000). *Microbiología de alimentos 1: Significado y método de elaboración*. (2^o. ed.), p. 454. Editorial Acribia S. A. Zaragoza, España.
- Inacal (2016). NTP ISO 2451. *Granos de cacao. Especificaciones*. (4^o. ed.). Lima.
- Inen (2006). NTE 176:2006. *Cacao en grano. Requisitos*. Lima.
- Jay, J. M. (2000). *Modern Food Microbiology*. (6o. ed.), p. 679. Gaithersburg (MD): Aspen,.
- Komitopoulou, E.; Peñaloza, W. (2009). Fate of Salmonella in Dry Confectionery Raw Materials. *Journal of Applied Microbiology* 106(6),1892-1900. doi: 10.1111/j.1365-2672.2009.04144.x
- Lippi, D. (2013). History of the Medical Use of Chocolate. In Ross Watson, R., Preedy, RB., Zibai, S. (eds.). *Chocolate in health and nutrition*. Humana Press. Series Editor: Adrienne Bendich.
- Loo-Miranda, J. L. M.; Chire-Fajardo, G. C.; Ureña-Peralta, M. O. (2020). Modeling of the Variation of the Electrical Conductivity of the Leachate of Cocoa with Different Fermentation Index. *Enfoque UTE* 11(3), 46-54.
- Ministerio de Salud (Minsa). (2008). *Norma sanitaria que establecen los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano*. N591, Lima, pp. 19-20.
- Mozzi, F.; Ortiz, M. E.; Bleckwedel, J. et al. (2013). Metabolomics as a Tool for the Comprehensive Understanding of Fermented and Functional Foods with Lactic Acid Bacteria. *Food Research International* 54(1), 1152–1161. doi:10.1016/j.foodres.2012.11.010
- Nascimento, M. D. S.; Pena, P. O.; Brum, D. M. et al. (2013). Behavior of Salmonella during Fermentation, Drying and Storage of Cocoa Beans. *International Journal of Food Microbiology* 167(3), 363-368. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2013.10.003
- Papalexandratou, Z.; Lefeber, T.; Bahrim, B. et al. (2013). *Hanseniaspora opuntiae*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus fermentum*, and *Acetobacter pasteurianus* Predominate during Well-Performed Malaysian Cacao Bean Box Fermentations, Underlining the Importance of these Microbial Species for a Successful Cacao Bean Fermentation Process. *Food Microbiology* 35(2), 73-85. doi: 10.1016/j.fm.2013.02.015
- Portillo, E.; Graziani De Fariñas, L.; Betancourt, E. (2005). Effect of Postharvest Treatments on Temperature and Fermentation Index in Quality of Porcelana (*Theobroma Cacao* L.) Criollo Cocoa Bean in the South of Maracaibo Lake. *Revista Facultad Agronomía (LUZ)* 22(4), 388-399.
- Sangronis, E.; Soto, M. J.; Valero, Y. et al. (2014). Cascarilla de cacao venezolano como materia prima para infusiones. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 64(2), 123-130.
- Sarbu, I.; Csutak, O. (2019). The Microbiology of Cocoa Fermentation. In: Grumezescu, AM., Holban, AM. (eds). Vol. 8. *Cafeinated and Cocoa Based Beverages. The science of beverages*. Woodhead publishing, pp. 423-446.
- Scott, V. N.; Chen, Y.; Freier, T. A. et al. (2009). Control of Salmonella in Low-moisture Foods. I: Minimizing Entry of Salmonella into a Processing Facility. *Food Protection Trends* 29(6), 342-353.
- Zahouli, GIB.; Tagro-Guehi, S.; Monké-Fac A. Et Al. (2010). Effect of Drying Methods on the Chemical Quality Traits of Cocoa Raw Material. *Advance journal of Food Science and Technology* 2(4), 184-190.
- Zambrano, A.; Gomez, A.; Ramos, G. et al. (2010). Caracterización de parámetros fisicoquímicos de calidad en almendra de cacao criollo, trinitario y forastero durante el proceso de secado. *Agronomía Tropical* 60(4), 389-396.
- Werber, D.; Dreesman, J.; Feil, F. et al. (2005). International outbreak of Salmonella Oranienburg due to German chocolate. *BMC Infectious Diseases* 5(1), 5-7. doi: 10.1186/1471-2334-5-7

Análisis físico - químico e influencia de los minerales disueltos en el sabor del agua potable, de las principales plantas de tratamiento de Quito

(Physical - chemist analysis and influence of dissolved minerals on the tap water taste from Quito's principals treatment plants)

Stephanie Torres-Silva¹, Ivan Tapia-Calvopiña², Lorena Goetschel-Gomez³, Edgar Pazmiño-Salazar⁴

Resumen

El sabor del agua potable está influenciado por sustancias disueltas como: Na^+ , K^+ , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} y CaCO_3 . El presente estudio se llevó a cabo en la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (Epmaps), encargada de potabilizar y distribuir el agua en Quito. Se tomaron muestras de agua en seis plantas de tratamiento durante cinco semanas y se realizaron los siguientes análisis: evaluación sensorial con un panel de jueces entrenados, que determinaron el grado de aceptación (Prueba FRA (Flavor Rating Assessment)) y el grado de satisfacción (Prueba hedónica), determinación de parámetros fisicoquímicos y de la concentración de minerales disueltos. Posteriormente, se correlacionó la concentración de minerales y el sabor, mediante análisis factorial múltiple con análisis de componentes principales. Se demostró que la concentración de minerales disueltos influye directamente en el sabor del agua potable y que, estadísticamente, el mejor método sensorial es la prueba hedónica. Todas las muestras cumplieron la norma ecuatoriana y únicamente el agua de la planta de tratamiento 2 (PT2) obtuvo menor valoración sensorial. Su sabor fue descrito como ligeramente salado, lo que se relaciona con sus concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CaCO_3 y Cl^- .

Palabras clave

Agua potable; minerales disueltos; sabor; análisis sensorial, Quito.

Abstract

Drinking water flavor is influenced by some dissolved substances like Na^+ , K^+ , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} and CaCO_3 . This research was conducted in the Public Metropolitan Water and Sanitation Company or EPMAPS (for its acronym in Spanish) which is in charge of water purification and distribution in Quito. It was taken samples from six different treatment plants during five weeks and the following analysis were made: Sensory analysis executed by a panel of trained judges, who evaluated the acceptance ratio (FRA Test (Flavor Rating Assessment)) and the satisfaction ratio (Hedonic Test), physiochemical parameters determination and dissolved minerals concentration. Later the minerals concentration was correlated with the water's flavor through a multiple factor analysis with main components analysis. As a result of this correlation, it was evidenced that the dissolved mineral concentration directly influences on the tap water flavor and determined statistically that the best sensory analysis is the Hedonic Test. Only the water from the treatment plant number 2 (PT2) obtained a lower sensorial valuation, whose flavor was described as lightly salted, which is related to its concentration of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CaCO_3 and Cl^- .

Keywords

Drinking water; dissolved minerals; taste; sensory analysis, Quito.

1 Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. [gemestephy1torres@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9043-1554>]
2 Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. [iltapia@uce.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-9305-4793>]
3 Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. [loregoe@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3691-2303>]
4 Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. [empazmio@uce.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-0213-2977>]

1. Introducción

El agua que es consumida por el ser humano, debe cumplir con parámetros de calidad, inocuidad y con expectativas en cuanto al sabor (Rahman I., 2017). La detección de un determinado sabor u olor anormal en el agua está asociada a una percepción de baja calidad (Sancho, 2002), por lo que es necesaria su evaluación sensorial. Los consumidores son muy sensibles respecto al agua para beber, por eso los proveedores deben mantener su calidad en los niveles más altos posibles. Las pruebas, diseños y análisis deben abordarse de manera que permitan optimizar la sensibilidad, validez y confiabilidad (Burlingame G., 2017). Por otro lado, el desarrollo de un protocolo simple, para formar un panel sensorial conformado por un mínimo de 6 jueces especialmente seleccionados y capacitados, es una herramienta útil para evaluar la calidad de un alimento o bebida (Salguero, 2013), y el uso de herramientas estadísticas multivariantes se aplica en la evaluación sensorial (Villarreal, 2003).

El contenido inorgánico del agua potable se ve afectado por el tratamiento químico y por la composición hidrogeoquímica de las aguas subterráneas o de superficie, incluyendo ríos y embalses (Dinelli E., 2012); además, la naturaleza y la concentración de minerales disueltos afectan su sabor y aceptación (Vingerhoeds, 2017; Wang, 2016). Las sustancias químicas presentes en el agua potable dependen de varios factores, como: la fuente de agua (con relación al contenido de Fe, Cu, Zn, Al, Ca, Mg, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y contaminantes como la geosmina), el método de tratamiento (cloro, cloraminas, ozono) y los sistemas de distribución (Fe, Cu, y polímeros como hidrocarburos). Adicionalmente, el agua puede influir significativamente en el sabor de alimentos y bebidas (Vingerhoeds, 2017), y su composición contribuye a la ingesta diaria de minerales requeridos por el ser humano desde el punto de vista nutricional (Azoulay A., 2001); (Perry, 2013).

En el estudio "Influencia de minerales en el sabor del agua embotellada y el agua de grifo, un enfoque quimiométrico" (Platikanov S., 2013), que se realizó en España, se evaluó el grado de aceptación de varias muestras de agua, mediante pruebas sensoriales con jueces entrenados y se comparó trece propiedades fisicoquímicas mediante ACP (Análisis de Componentes Principales). Los resultados mostraron que, las muestras de las dos clases de agua que tuvieron más aceptación, se asociaron a un contenido medio de sólidos totales disueltos, a la alta concentración de HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mn^{2+} , y a valores de pH relativamente altos en el agua potable. Las altas concentraciones de Na^+ , K^+ y Cl^- fueron percibidas por varios jueces, mientras que el cloro residual no tuvo ningún efecto en los resultados, y los jueces no pudieron distinguir entre agua embotellada y agua potable.

En otro estudio se investigó la preferencia de tres tipos de agua: agua embotellada, agua potable de grifo y agua potable reciclada, mediante una prueba de sabor a ciegas realizada por 143 participantes. Los evaluadores prefirieron el agua embotellada y el agua reciclada, las que fueron tratadas con ósmosis inversa, sobre el agua potable de grifo que presentó niveles de pH más altos y concentraciones más bajas de Ca y HCO_3^- (Harmon D., 2018).

En una investigación sobre la influencia de diferentes concentraciones de hierro y dureza del agua, en la percepción del sabor de bebidas endulzadas con diferentes edulcorantes mediante una prueba hedónica de 9 puntos, el Fe^{2+} creó un sabor metálico en el agua y disgustó a los consumidores, mientras que Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ casi no tuvieron impacto en la percepción del sabor. Además, la interacción entre la sacarosa y los iones ferrosos aumentó significativamente la aceptación del agua muy dura, y la percepción del sabor dulce (Wang A., 2016).

El papel de los sulfatos y nitratos en el sabor del agua potable depende del umbral de concentración, lo que se comprobó mediante la realización de pruebas dúo-trío con un panel entrenado, que permitieron determinar que el umbral de detección de NO_3^- es alto (100 mg/l), y que no es relevante para el sabor del agua. Por el contrario, el 75 % de los jueces percibieron como salado y amargo el sabor del agua con una concentración de 160 mg/l de $\text{Na}_2(\text{SO}_4)$ y de 80 mg/l de CaSO_4 (López et al., 2017).

La Usepa (United States Environmental Protection Agency), estableció 15 parámetros del agua potable que producen efectos organolépticos (Al, Cl, color, Cu, corrosividad, F, agentes espumantes, Fe, Mn, olor, pH, Ag, SO_4^{2-} , sólidos disueltos totales y Zn) bajo la ley 40 CFR 141. 208 (Usepa, 2020), información que sirvió de base para el estudio de Dietrich y Burlingame en el 2020 (p. 1), quienes asociaron la presencia de 21 sustancias químicas puras a concentraciones mayores al umbral del olor y sabor, mediante el uso de descriptores como "salado" para altas concentraciones de sodio, y "clorado" para el cloro libre. Estos descriptores ayudan a evitar confusión en los consumidores y llegar a un consenso sobre el sabor. Los mismos autores, en una publicación anterior, indican que las concentraciones altas de Cl, Cu, F, Fe y Mn tienen efectos organolépticos, lo que afecta la calidad percibida por los consumidores del agua potable (Dietrich y Burlingame, 2014).

Los minerales presentes en el agua, además de influir en su calidad, al ser ingeridos por el consumidor aportan a la ingesta diaria recomendada de estos micronutrientes, según se explica en el estudio "El contenido mineral en el agua de grifo en los hogares de Estados Unidos" (Perry, 2013), donde se analizó el contenido de ocho minerales: Na, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, P y Zn, en muestras del agua de grifo residencial de este país, que sirvió para generar los datos actuales de la Base de Datos Nacional de Nutrientes de la USDA. Suponiendo un consumo diario de un litro de agua del grifo por persona, se concluyó que proporciona en promedio más del 1 % de la ingesta diaria recomendada de cuatro minerales (Cu, Ca, Mg y Na), de los ocho estudiados.

En el campo industrial se observó el efecto de la calidad del agua en el sabor del té verde y el té negro, al preparar los dos tipos de té con diferentes clases de agua. Se analizó el color, la turbidez, el contenido de epicatequinas y el sabor de las dos clases de infusiones y se concluyó que el tipo de agua afecta la aceptabilidad por parte del consumidor, ya que el agua desionizada o purificada extrae del té mayor contenido de catequinas que aportan al sabor de la infusión (Franks, 2019).

En el Ecuador no existen datos sobre la correlación existente entre el sabor y la presencia de minerales en el agua potable, a pesar de que las estadísticas indican que, en ciudades como Quito, cada habitante consume un valor estimado de 200 litros de agua potable al mes, de los que ingiere como bebida aproximadamente 2 litros al día (INEC, 2013), lo que justifica la presente investigación.

El objetivo principal de este estudio fue determinar la influencia de minerales disueltos (Na^+ , K^+ , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CaCO_3 , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) en el sabor del agua, mediante análisis físico-químico y sensorial de las muestras de agua potable obtenidas en seis plantas de tratamiento de la ciudad de Quito, a fin de comprobar la hipótesis formulada que indica, que el contenido de minerales disueltos influye en el grado de aceptación y satisfacción sensorial del agua potable.

2. Metodología

El estudio se llevó a cabo en las plantas de tratamiento y en el laboratorio de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (Epmaps), en cuyas instalaciones se recibe, trata y potabiliza el agua destinada al Distrito Metropolitano de Quito.

2.1. Muestreo: Para tomar una muestra representativa de cada planta, se realizó un plan de muestreo que contempló tomar cinco muestras (una cada semana), de las seis plantas de tratamiento que generan mayor volumen de agua potable de la Epmaps (30 muestras en total), antes de su distribución y abastecimiento hacia la mayoría de los barrios de Quito DM, durante los meses comprendidos entre mayo y julio del 2017. Se analizaron seis parámetros físico-químicos generales de cada muestra (180 ensayos) y once minerales por cinco repeticiones (total: 1650 datos), y dos análisis sensoriales (prueba FRA y prueba hedónica) de cada muestra semanal (60 análisis sensoriales) con un panel de cata que tuvo mínimo seis jueces entrenados para cada semana, según lo descrito en la bibliografía (Salguero, 2013). En todas las plantas se analizó las muestras antes y después del tratamiento de potabilización.

2.2. Análisis físico-químicos: El contenido de cloro libre residual se analizó con un medidor de cloro digital DPD, marca LaMotte 1200, mediante reacción colorimétrica in situ (Standard Methods 4500-Cl-G, 2012). El pH se midió con un potenciómetro, marca InoLab nivel 1 modelo ba12217e (Standard Methods 4500-H+-B, 2012); la conductividad y sólidos totales disueltos por conductimetría (Standard Methods 2510-B, 2012) en un conductímetro marca InoLab nivel 1 multi parámetros modelo 1F10-220, color por comparación visual, utilizando un colorímetro marca Agua Tester Modelo 611-A (Standard Methods 2120-B, 2012); y la turbiedad por el método nefelométrico (Standard Methods 2130-B, 2012).

2.3. Análisis de minerales disueltos: El contenido de sodio y potasio se determinó en un espectrofotómetro de absorción atómica Varian Modelo AA240FS, a una longitud de onda de 589.0 nm y 766.5 nm respectivamente, mientras que la concentración de hierro y cobre se obtuvo por absorción atómica con lámpara multielementos (Co/Cr/Cu/Fe/Mn/Ni), mediante aspiración directa en llama de aire – acetileno, en el mismo equipo en el que se analizó el sodio y potasio, a una longitud de onda de 324.8 nm para el cobre, y 248.3 nm para el hierro (Standard Methods 3111-B, 2012).

La cuantificación de calcio se realizó por medio de la determinación de la dureza cálcica por titulación con EDTA (Standard Methods 3500-Ca-B, 2012), mediante el uso de una bureta digital, y la de magnesio por cálculo, utilizando este mismo método para determinar dureza total (NTE INEN 974, 2016) (Standard Methods 3500-Mg-B, 2012).

La concentración de carbonato de calcio se determinó a través de la medición de la alcalinidad por titulación con ácido sulfúrico (INEN ISO 9963-1, 2014), el contenido de bicarbonato de calcio se obtuvo por cálculo, y la de cloruros por titulación con nitrato de plata (Standard Methods 4500-Cl-B, 2012). Para las determinaciones analíticas se utilizaron buretas digitales.

La cantidad de nitratos se analizó por *screening* ultravioleta a una longitud de onda de 275 nm (Standard Methods 4500-NO3-B, 2012) y la de sulfatos por espectrofotometría a una longitud de onda de 420 nm (Standard Methods 4500-SO4-E, 2012) en el espectrofotómetro UV – VIS marca Varian modelo CARY50.

2.4. Análisis sensorial: La evaluación del sabor del agua se realizó mediante la aplicación de dos pruebas sensoriales. Inicialmente se efectuó la prueba FRA (Flavor Rating Assessment), modificada de la Epmaps, que utiliza una escala de 5 puntos, donde 1=Estaría encantado de aceptar esta agua como mi agua de consumo diario y 5=No podría aceptar esta agua como mi agua de consumo diario (Standard Methods 2160-C, 2012). Luego de un receso de 10 minutos, los jueces realizaron la prueba hedónica de 9 puntos, cuya escala se puntúa de 1 a 9, donde: 1=Extremadamente agradable y 9=Extremadamente desagradable (Sancho, 2002). Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), Anova de dos factores, con una muestra

por grupo, donde el factor A son las muestras de agua potable de cada planta de tratamiento y el factor B es la variabilidad de los resultados de los jueces entrenados, además de analizar el contraste entre promedios basado en la diferencia mínima significativa (DMS).

2.5. Análisis estadístico: Se procesaron los 1650 datos, obtenidos de la concentración de minerales disueltos (Na^+ , K^+ , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CaCO_3 , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), mediante un diseño anidado o jerárquico con la ayuda del software estadístico Statgraphics Centurion versión 17, donde el factor A corresponde a las muestras de agua potable de cada planta de tratamiento y el factor B a la semana de muestreo. Se utilizó el diseño anidado porque existe una jerarquía o anidamiento de los niveles del segundo factor en cada uno de los niveles del primero. Además, este diseño permitió evaluar la concentración de once analitos que pertenecen a seis plantas de tratamiento (A). De cada planta de tratamiento se realizó el análisis durante cinco semanas de muestreo (B), sobre las cuales se realizan cinco repeticiones (C). Se observó mediante este diseño que la mayor variación proviene de las plantas de tratamiento (A), seguido de la semana de muestreo (B) y que existe muy poca contribución a la variabilidad otorga por el factor de repeticiones (C).

Finalmente, para correlacionar el sabor del agua con la concentración de los minerales estudiados, se efectuó el análisis estadístico multifactorial y el análisis de componentes principales (ACP) con la ayuda del software estadístico Minitab versión 17.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis físico-químicos

Los parámetros generales de calidad del agua que se analizaron, son: cloro libre residual, pH, conductividad, sólidos totales disueltos (STD), color y turbiedad. Los resultados se muestran en la tabla 1, en la que se puede apreciar que existe variación de los valores en las cinco semanas de muestreo en todas las plantas. Se determinó que PT2 tuvo mayor conductividad y mayor contenido de STD, lo que se relaciona con la palatabilidad, ya que una concentración de STD menor a 600 mg/l corresponde a agua de buena palatabilidad, mientras que, a valores mayores de conductividad, la palatabilidad disminuye significativa y progresivamente (OMS, 2006). Además, la conductividad y STD se relacionan directamente, por lo que, la conductividad influye de manera inversa en el sabor del agua, según se describe posteriormente.

Los resultados coinciden con lo señalado en 2017 por Virgerhoeds, quien indica que el parámetro STD es un determinante importante en la percepción del agua (pp. 42-57), y que el agua tiene sabor más fresco a una concentración de STD entre 19 y 350 mg/l. Otro aspecto a considerar en esta publicación es que la calidad sensorial percibida del agua mejora al realizar un proceso de ósmosis inversa y de remineralización.

En cuanto a los demás parámetros generales, todas las muestras cumplieron con los niveles indicados en la Norma Técnica Ecuatoriana del Agua Potable (INEN 1108, 2020), que son: turbiedad menor a 5 NTU, sabor y olor aceptables, cloro libre residual de 0.3 a 1.5 mg/l, y color aparente máximo de 15 UCA (unidades de color aparente).

Tabla 1. Valores promedios de parámetros generales de calidad de agua durante los meses de mayo a julio del 2017 en Epmaps.

Parámetro general	PLANTAS DE TRATAMIENTO						
	n	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6
Cloro libre residual (mg/l)	30	1.09 ± 0.16	1.13 ± 0.67	1.18 ± 0.13	1.25 ± 0.16	1.20 ± 0.16	1.15 ± 0.16
pH	30	7.34 ± 0.21	7.29 ± 0.07	7.08 ± 0.15	7.24 ± 0.17	7.31 ± 0.43	7.33 ± 0.24
Conductividad (µS/cm)	30	104.9 ± 19.6	726.4 ± 3.1	208.3 ± 21.9	212.2 ± 49.9	172.2 ± 63.8	99.8 ± 21.1
STD (mg/l)	30	53 ± 10	363 ± 2	104 ± 11	106 ± 25	86 ± 32	50 ± 11
Color (UCA Pt-Co)	30	0 ± 0	0 ± 0	1 ± 3	2 ± 3	1 ± 7	0 ± 0
Turbiedad (NTU)	30	0.509 ± 0.014	0.500 ± 0.161	0.500 ± 0.000	0.693 ± 0.201	0.596 ± 1.726	0.536 ± 0.000

n= número de ensayos realizados.

Como resumen de los resultados, la tabla 2 indica los promedios y desviaciones estándar de todos los minerales analizados en las plantas de tratamiento.

Tabla 2. Concentración de minerales promedios en agua potable durante los meses de mayo a julio del 2017 en Epmaps.

Mina- rales (mg/l)	PLANTAS DE TRATAMIENTO													
	n	PT1		PT2		PT3		PT4		PT5		PT6		
Na ⁺	150	6.70	± 2.50	59.37	± 18.83	13.72	± 4,45	12.02	± 2.78	10.42	± 5.06	8.04	± 3.90	
K ⁺	150	1.31	± 0.31	6.51	± 1.57	3.58	± 1,15	2.80	± 0.54	2.90	± 0.53	1.32	± 0.11	
Ca ²⁺	150	7.58	± 1.79	20.62	± 2.84	13.16	± 1,87	16.79	± 1.75	11.37	± 4.80	7.70	± 1.81	
Mg ²⁺	150	3.72	± 1.19	41.63	± 12.85	8.35	± 1,47	8.03	± 0.38	7.11	± 3.76	3.35	± 0.47	
HCO ₃ ⁻	150	30.10	± 6.40	344.73	± 86.10	65.98	± 16,53	84.53	± 6.15	65.45	± 40.39	29.25	± 6.43	
CaCO ₃	150	26.74	± 6.65	270.19	± 70.33	55.78	± 15,48	69.62	± 5.53	54.38	± 34.82	25.59	± 7.90	
SO ₄ ⁻	150	15.83	± 4.45	27.04	± 13.68	39.12	± 1,46	28.89	± 3.20	27.24	± 9.65	13.42	± 2.79	
Cl ⁻	150	8.82	± 2.77	36.17	± 14.08	9.13	± 1,99	9.01	± 3.05	7.77	± 3.46	8.35	± 3.34	
Fe	150	<0.05		<0.05		<0.05		<0.05		<0.05		<0.05		
Cu	150	<0.014		<0.014		<0.014		<0.014		<0.014		<0.014		
NO ₃	150	<0.001		3.79	± 0.42	<0.001		<0.001		<0.001		<0.001		

n= número de ensayos realizados.

A partir de los datos de la tabla 2, se realizó el análisis estadístico de diseño anidado o jerárquico (tabla 3), que permite explicar la influencia de la cantidad de minerales, mediante la estimación de varianza de estos parámetros, en dos fuentes estadísticas que son plantas de tratamiento y semana de muestreo del agua potable. El resultado indica que estadísticamente el porcentaje de varianza más alto y cercano al 100 % corresponde a la concentración de Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, y CaCO₃, que varía significativamente con relación a la fuente: plantas de tratamiento.

No se realizó el análisis de varianza mediante el diseño anidado para el contenido de Fe^{3+} , Cu^{2+} , y NO_3^- , debido a que los datos fueron menores al límite de cuantificación. Estos resultados contrastan con los obtenidos en 2013 por Platikanov et al., quienes demostraron que estos tres parámetros sí influyen en el sabor del agua. Cabe indicar que todas las muestras cumplieron con los requisitos de la NTE (INEN 1108, 2020) en lo referente al límite máximo permitido de Cu^{2+} que es 2,0 mg/l y de NO_3^- que es 50 mg/l. El contenido máximo de hierro no se especifica en la norma.

Tabla 3. Diseño anidado o jerárquico de dos factores.
Respuesta experimental: concentración en (mg/l) de minerales

Mineral	Fuente	F	Valor crítico	% S ²
Na ⁺	Planta de tratamiento (A)	5917.970	2.620	89.66
	Semana de muestreo (B)	53.080	1.610	9.95
K ⁺	Planta de tratamiento (A)	377 521.550	2.620	84.22
	Semana de muestreo (B)	5572.860	1.610	15.77
Ca ²⁺	Planta de tratamiento (A)	3640.470	2.620	66.17
	Semana de muestreo (B)	142.060	1.610	33.35
Mg ²⁺	Planta de tratamiento (A)	4841.890	2.620	96.56
	Semana de muestreo (B)	12.760	1.610	2.94
HCO ₃ ⁻	Planta de tratamiento (A)	9489.760	2.620	95.80
	Semana de muestreo (B)	32.210	1.610	3.95
CaCO ₃	Planta de tratamiento (A)	319 917.220	2.620	90.52
	Semana de muestreo (B)	2656.760	1.610	9.47
SO ₄ ²⁻	Planta de tratamiento (A)	21.320	2.620	38.50
	Semana de muestreo (B)	1.530	1.610	12.80
Cl ⁻	Planta de tratamiento (A)	23.150	2.620	33.50
	Semana de muestreo (B)	2.310	1.610	26.30

Según se detalla en la tabla 4, el contenido de minerales en el agua cruda presenta variaciones en las diferentes plantas y luego del tratamiento los valores de cada parámetro físico-químico disminuyen o se incrementan. Por ejemplo, los sulfatos y el cloro libre residual, que son residuos de agentes químicos agregados en la potabilización, no influyen en el sabor y se incrementan cuando se potabiliza del agua. En tanto que los demás parámetros disminuyen, como es el caso del hierro, cuyos valores fueron menores al límite de detección en todas las muestras, al igual que el contenido de NO_3^- para PT2, PT1, PT4 y PT6. La variación de los demás parámetros fue menor y se puede observar que PT2 presenta mayor concentración de todos los analitos, tanto en el agua cruda como en la tratada.

Tabla 4. Comparación de agua cruda AC (antes) con agua tratada AT (después), durante los meses de mayo a julio del 2017

Parámetro	Tipo	%	Unidad	LM NTE INEN	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6
pH	AC	12 - 15	-	N/A	6.11 - 8.01	6.86 - 7.30	7.92 - 8.06	7.41 - 8.00	6.89 - 7.85	7.44 - 8.18
	AT				7.00 - 7.56	7.18 - 7.45	6.89 - 7.35	7.06 - 7.40	6.88 - 7.66	6.77 - 7.78
Conductividad	AC	5 - 10	μS/cm	N/A	108.9 - 110.1	690.0 - 726.0	205.0 - 213.0	170 - 193.4	171.5 - 172.5	90 - 92.2
	AT				75.6 - 124.8	723.0 - 731.0	178.3 - 235.0	200.0 - 220.0	101.0 - 236.0	76.0 - 121.1
STD	AC	5 - 10	mg/l	N/A	54 - 55	258.9 - 345	103 - 106	85 - 97	87 - 88	45 - 46
	AT				38 - 62	362 - 364	89 - 118	100 - 110	51 - 118	38 - 61
Color	AC	75	UCA	15	5 - 20	0 - 15	0 - 35	5 - 20	0 - 15	0 - 10
	AT				0	0	0 - 5	0 - 5	0 - 5	0
Turbiedad	AC	75 - 90	NTU	5	1.68 - 2.00	0.50 - 5.27	1.03 - 3.84	0.53 - 1.79	0.85 - 1.02	1.0 - 4.32
	AT				0.50 - 0.53	0.50	0.50	0.50 - 0.992	0.50 - 0.80	0.50 - 0.68
Sodio	AC	10	mg/l	N/A	9.9639 - 10.1179	72.2684 - 72.8662	15.2670 - 15.5235	13.0627 - 13.2039	10.9247 - 11.0125	7.3399 - 7.3815
	AT				2.7506 - 8.5435	58.8439 - 83.0381	6.4472 - 17.5237	7.1535 - 14.0248	6.5432 - 18.5865	2.8815 - 13.1928
Potasio	AC	15	mg/l	N/A	1.2727 - 1.2816	7.0918 - 7.1893	3.5365 - 3.5682	2.9634 - 2.9805	7.5620 - 7.6299	3.6382 - 3.6592
	AT				1.0635 - 1.2937	7.0284 - 7.2380	2.9068 - 5.6274	2.3618 - 3.6168	2.0839 - 3.5040	1.1871 - 1.4559
Hierro	AC	0 - 100	mg/l	N/A	0.228 - 0.460	<0.050	0.282 - 0.620	0.087 - 0.092	0.154 - 0.280	0.210 - 0.437
	AT				<0.050 - 0.060	<0.050	<0.050 - 0.062	<0.050 - 0.057	<0.050 - 0.149	<0.050 - 0.085

%; porcentaje aproximado de reducción o aumento en promedio. LM: Límite máximo permitido

Continuación Tabla 4

Parámetro	Tipo	%	Unidad	LM NTE INEN	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6
Cobre	AC	0	mg/l	2.0	<0.014	<0.014	<0.014	<0.014	<0.014	<0.014
	AT				<0.014	<0.014	<0.014	<0.014	<0.014	<0.014
Calcio	AC	10	mg/l	N/A	7.34 - 8.16	26.76 - 27.74	11.26 - 12.73	10.93 - 11.42	8.81 - 9.96	4.24 - 4.90
	AT				4.45 - 8.69	19.55 - 23.57	10.74 - 15.21	16.89 - 18.33	5.88 - 16.18	5.30 - 10.22
Magnesio	AC	10	mg/l	N/A	4.40 - 4.98	50.45 - 50.75	9.85 - 10.15	11.64 - 11.94	8.56 - 8.76	5.77 - 6.17
	AT				2.83 - 5.05	45.73 - 49.82	6.79 - 10.65	7.57 - 8.54	3.53 - 12.84	2.54 - 3.73
Bicarbonato de calcio	AC	20	mg/l	N/A	43.33 - 45.14	377.82 - 380.53	97.50 - 102.02	95.70 - 112.85	85.31 - 94.79	44.69 - 58.68
	AT				20.90 - 37.11	375.20 - 391.69	42.52 - 87.30	74.57 - 91.32	23.47 - 127.25	20.90 - 37.92
Carbonato de calcio	AC	30	mg/l	N/A	35.52 - 37.00	309.69 - 311.91	79.92 - 83.62	78.44 - 92.50	69.93 - 77.70	36.63 - 48.10
	AT				17.13 - 34.10	246.57 - 321.06	38.55 - 72.40	61.12 - 76.52	19.24 - 104.30	17.13 - 36.38
Sulfatos	AC	10 - 100	mg/l	N/A	1.6 - 1.8	30.6 - 31.9	1.0 - 2.1	3.0 - 3.3	8.0 - 8.1	1.3 - 1.5
	AT				11.6 - 23.1	31.7 - 33.7	37.4 - 41.0	25.7 - 34.1	13.8 - 38.8	9.1 - 16.7
Nitratos	AC	0 - 100	mg/l	50	<2.215	2.981 - 3.438	0.443 - 0.549	<2.215	0.665 - 0.793	<2.215
	AT				<2.215	0.000 - 3.743	<2.215	<2.215	<2.215	<2.215
Cloruros	AC	0 - 100	mg/l	N/A	1.94 - 3.89	6.24 - 41.77	1.94 - 3.89	0.97 - 1.94	0.97 - 1.94	0.97 - 3.89
	AT				6.4 - 12.5	37.7 - 45.1	7.4 - 12.3	4.5 - 12.6	2.5 - 11.3	6.2 - 12.3

%; porcentaje aproximado de reducción o aumento en promedio. LM: Límite máximo permitido.

3.2. Análisis sensorial y correlación con el contenido de minerales

En la figura 1 se observa la relación existente entre las muestras de las diferentes plantas de tratamiento y la apreciación numérica de los jueces en las dos pruebas sensoriales. Al aplicar

la prueba FRA se determinó que PT2 (Planta de tratamiento 2) se acerca a un valor aproximado de: 3= Tal vez podría aceptar esta agua como mi agua de consumo diario, mientras que las otras plantas a: 2= Estoy seguro de que podría aceptar esta agua de consumo diario. De igual manera, en la prueba hedónica PT2 se acerca a: 5= Ni agradable ni desagradable, PT1 y PT5 a: 3= Agradable, y PT3, PT4 y PT6 a: 4= Ligeramente agradable.

Al realizar el Anova de 2 factores DBCA, se determinó que en la semana de muestreo 1, el factor plantas de tratamiento es significativo (representado con un *), para la prueba FRA y el mismo factor es significativo en las semanas de muestreo 2, 3, 4 y 5 para la prueba hedónica, como se muestra en la tabla 5. Además, con la DMS se mostró que el promedio de la muestra PT2 mantuvo una diferencia significativa con respecto a las demás muestras. Estadísticamente la prueba FRA de grado de aceptación no permitió diferenciar entre muestras, mientras que la prueba hedónica permitió realizar esta diferenciación y posteriormente correlacionar con los parámetros físico-químicos.

Figura 1. Apreciación de los jueces entrenados vs plantas de tratamiento del agua potable evaluada

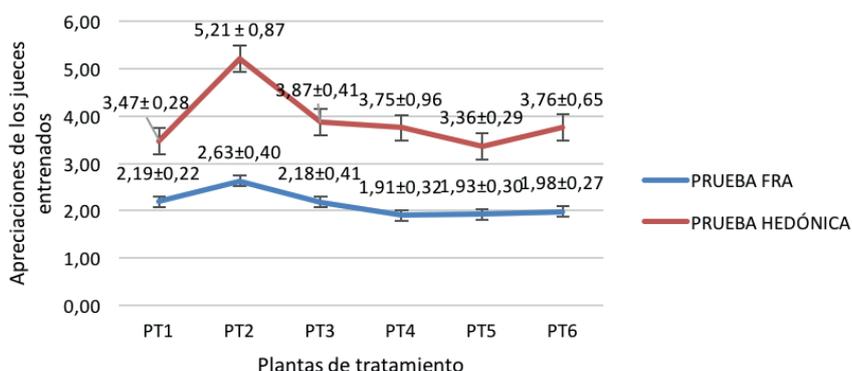


Tabla 5. Análisis de varianza y comparación de las medias de los resultados entre las plantas de tratamiento por DMS

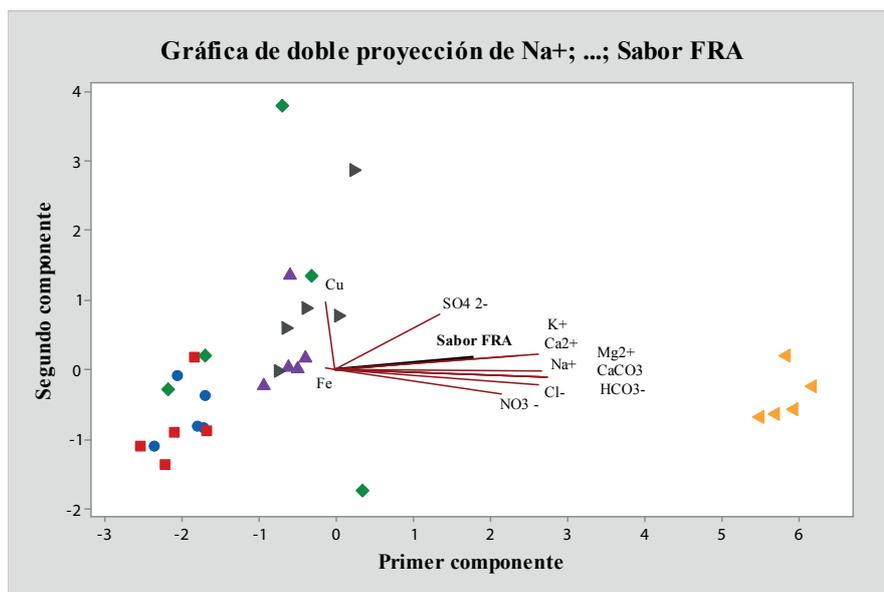
Semana de muestreo	Origen de las variaciones	PRUEBA FRA				PRUEBA HEDÓNICA			
		F	Valor crítico para F	S	DMS	F	Valor crítico para F	S	DMS
1	Jueces	1.368	2.285	NS	$\bar{X} T \neq \bar{X} P = \bar{X} TR$	2.044	2.603	NS	$\bar{X} T = \bar{X} P = \bar{X} TR$
	Plantas de tratamiento	2.732	2.485	*	$= \bar{X} PA = \bar{X} B = \bar{X} PL$	1.816	2.603	NS	$= \bar{X} PA = \bar{X} B = \bar{X} PL$
2	Jueces	0.606	2.421	NS	$\bar{X} T = \bar{X} P = \bar{X} TR$	1.170	2.603	NS	$\bar{X} T \neq \bar{X} P = \bar{X} TR$
	Plantas de tratamiento	1.795	2.534	NS	$= \bar{X} PA = \bar{X} B = \bar{X} PL$	4.767	2.603	*	$= \bar{X} PA = \bar{X} B = \bar{X} PL$
3	Jueces	1.774	2.285	NS	$\bar{X} T = \bar{X} P = \bar{X} TR$	1.679	2.285	NS	$\bar{X} T \neq \bar{X} P = \bar{X} TR$
	Plantas de tratamiento	1.908	2.485	NS	$= \bar{X} PA = \bar{X} B = \bar{X} PL$	3.455	2.485	*	$= \bar{X} PA = \bar{X} B = \bar{X} PL$
4	Jueces	1.733	2.421	NS	$\bar{X} T = \bar{X} P = \bar{X} TR$	2.563	2.603	NS	$\bar{X} T \neq \bar{X} P = \bar{X} TR$
	Plantas de tratamiento	1.000	2.534	NS	$= \bar{X} PA = \bar{X} B = \bar{X} PL$	4.228	2.603	*	$= \bar{X} PA = \bar{X} B = \bar{X} PL$
5	Jueces	1.111	2.421	NS	$\bar{X} T = \bar{X} P = \bar{X} TR$	2.099	2.603	NS	$\bar{X} T \neq \bar{X} P = \bar{X} TR$
	Plantas de tratamiento	1.778	2.534	NS	$= \bar{X} PA = \bar{X} B = \bar{X} PL$	5.847	2.603	**	$= \bar{X} PA = \bar{X} B = \bar{X} PL$

Donde B: PT1, T: PT2, P: PT3, TR: PT4, PL: PT5 y PA: PT6. S: significancia. Jueces: catadores sensoriales entrenados.

Para correlacionar el grado de aceptación del sabor con el contenido de minerales en el agua potable, se aplicó el análisis de componentes principales (ACP), cuyo propósito fue obtener un número reducido de combinaciones lineales de las 12 variables que expliquen la mayor variabilidad en los datos. En este caso, se extrajeron tres componentes que tuvieron valores propios mayores o iguales a 1.0 y que explican el 84.003 % de la variabilidad en los datos originales.

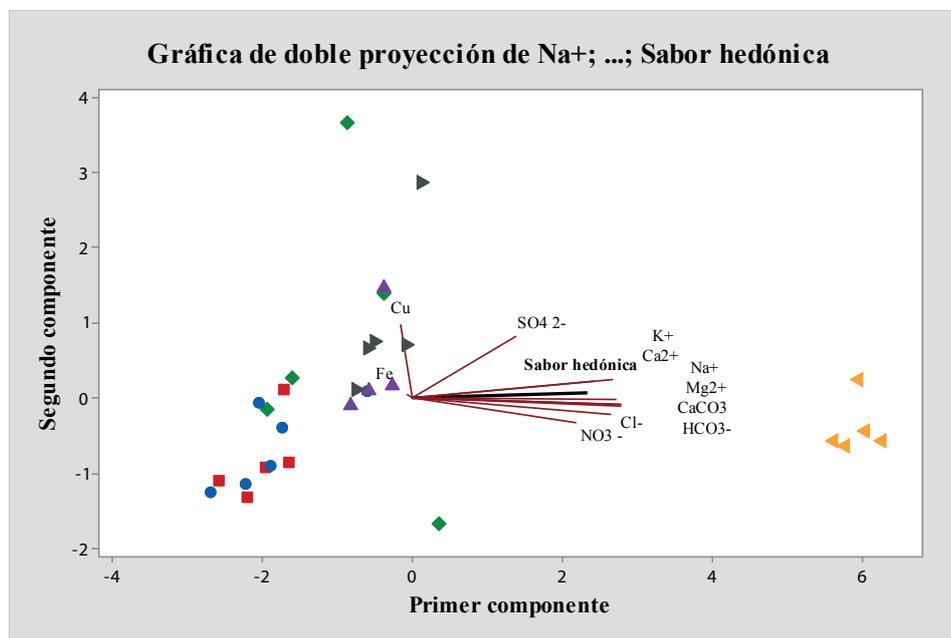
La figura 2 es una gráfica de proyección de la prueba FRA que sobrepone las puntuaciones (cada planta de tratamiento corresponde a un color), donde las cargas o vectores están marcadas con rojo (minerales y grado de aceptación del sabor), que permite evaluar la estructura de los datos. Se observa que las muestras de PT1 (marcado con azul) y PT6 (marcado con rojo), tienen apreciaciones sensoriales similares y se acercan medianamente a un sabor aceptable (punto de origen de las líneas rojas). Las muestras de PT4 (marcado con morado) y PT3 (marcado con gris) presentan mayor agrupación y son las más cercanas al punto de aceptación del sabor, mientras que las muestras de PT2 (marcado con amarillo), tienen altas concentraciones de K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , $CaCO_3$, HCO_3^- , Cl^- y NO_3^- y se encuentra más lejanas. Estos resultados son similares a los obtenidos en el estudio realizado en 2013 por Platikanov et al., donde la percepción del sabor se relacionó directamente con la presencia de los iones HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y Cl^- ; igualmente, el cloro residual no produjo ningún efecto en el sabor.

Figura 2. Gráfica de doble proyección de las variables minerales y grado de aceptación del sabor de las muestras de agua potable



De igual manera, se utilizó una gráfica de doble proyección (figura 3) para evaluar el grado de satisfacción obtenido en la prueba hedónica, para lo que se extrajó tres componentes principales que tuvieron valores propios mayores o iguales a 1.0; los que explican el 86.607 % de la variabilidad en los datos originales. Al igual que en la prueba FRA, las muestras de PT2 (marcado con amarillo), se encuentran más alejadas del punto de satisfacción del sabor. PT1 (marcado con azul) y PT6 (marcado con rojo) presentan resultados cercanos en cuanto al grado de satisfacción del sabor; mientras que PT4 (marcado con morado) y PT3 (marcado con plomo), se acercan más al punto de aceptación del sabor, al igual que PT5 (marcado con verde), a pesar de su dispersión.

Figura 3. Gráfica de doble proyección de las variables minerales y grado de satisfacción del sabor



Las dos figuras muestran la relación existente entre la percepción del sabor por parte de los jueces y la concentración de minerales. Al igual que en el estudio de Harmon en 2018 se concluye que las concentraciones bajas de Ca^{2+} y HCO_3^- en todas las muestras, a excepción de PT2, se relacionan con mayor preferencia sensorial.

De manera similar a lo descrito en 2017 por Virgerhoeds et al., los minerales presentes en el agua cruda como: Ca^{2+} , Mg^{2+} , CaCO_3 , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- aportan significativamente a la variación del sabor en el agua potable, ya que permanecen en cantidades detectables luego del tratamiento, además, en este caso las cantidades de Fe^{3+} y Cu^{2+} disminuyen a valores no cuantificables por el método utilizado y tampoco se percibió un sabor metálico en ninguna de las muestras.

Al contrastar con lo expuesto en el estudio de López et al., en 2017, donde los jueces indicaron que el agua tiene sabor salado debido a la presencia de SO_4^{2-} en este caso a pesar de que el valor de SO_4^{2-} de las muestras de PT3 es mayor que las otras plantas, no se perciben como saladas, debido a que contienen menos de 80 mg/l de este mineral. Las concentraciones de Na^+ de PT2 se relacionaron con un sabor ligeramente salado descrito por los jueces, similar a lo ocurrido en el artículo de revisión sobre los olores y sabores del agua para beber (Dietrich y Burlingame, 2020).

Según los resultados de las dos pruebas sensoriales, el agua potable de PT2 tiene una ligera diferencia de aceptación y satisfacción en cuanto a su sabor, sin embargo, contiene mayor concentración de minerales y por tal razón, otorga mayor valor nutricional. El aporte diario al consumir dos litros de agua de PT2 sería en promedio de 2.8 % de sodio, 0.2 % de potasio, 2.2 % de calcio, 11.9 % de magnesio y 1.8 % de cloruro del valor diario recomendado (VDR) según (INEN 1334-2, 2008), resultados que serían menores a los indicados en los estudios de Perry et al. en 2013 y de Azoulay et al. en 2001, quienes demostraron que al consumir dos litros de agua de grifo en Estados Unidos, el agua aporta de 8 a 16 % del valor diario de Ca^{2+} y entre 6 – 31 % de Mg^{2+} .

4. Conclusiones y recomendaciones

Se demostró que la concentración de minerales influye en el sabor del agua potable de las plantas de tratamiento de la Epmaps y que los minerales que más influyen en el sabor son Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CaCO_3 y Cl^- .

La determinación de parámetros generales permitió relacionar de manera directamente proporcional a la conductividad y los sólidos totales disueltos con la cantidad de minerales, y por tanto con el sabor del agua.

Al realizar la evaluación sensorial mediante dos tipos de pruebas, la hedónica y la prueba FRA, se concluye que la prueba hedónica de nueve puntos permite obtener resultados con diferencias significativas en relación con la concentración de minerales y el sabor percibido, mientras que la prueba FRA de cinco puntos no logra demostrar el objetivo de este estudio, por lo que es recomendable utilizar la prueba hedónica de nueve puntos.

El menor grado de satisfacción se obtuvo en las muestras de la planta de tratamiento 2, debido a sus mayores concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CaCO_3 y Cl^- , que a criterio del grupo de catadores se percibió con un sabor "ligeramente salado", lo que permitió comprobar la hipótesis de trabajo propuesta inicialmente.

Al comparar los resultados de este estudio con la norma NTE INEN 1108:2020, se concluye que todas las muestras de agua potable analizadas cumplieron con los requisitos de sabor, color, turbiedad, cloro libre residual, Cu^{2+} y NO_3^- , que son parámetros indicadores de calidad establecidos en dicha norma.

Se recomienda realizar estudios similares en el resto del país para conocer las características del agua cruda y tratada de varias ciudades y regiones del Ecuador, lo que permitirá determinar la influencia de parámetros como la altitud, tipo de fuente de agua, localización, en el sabor del agua potable y en los productos elaborados con la misma.

Referencias

- Azoulay A., G. P. (2001). Comparison of the Mineral Content of Tap Water and Bottled Waters. *Journal of the General Internal Medicine* 16, 168-175.
- Burlingame G., D. R. (2017). Humans as Sensors to Evaluate Drinking Water Taste and Odor: A Review. *American Water Works Association* (109), 13-22.
- Dietrich y Burlingame. (2014, December 17). Critical Review and Rethinking of Usepa Secondary Standards for Maintaining Organoleptic Quality of Drinking Water. *Environmental Science and Technology* 49(2), 708-720. doi: 10.1021/es504403t
- Dietrich y Burlingame. (2020, October 17). A Review: The Challenge, Consensus, and Confusion of Describing Odors and Tastes in Drinking Water. Vol. 713. *Science of the Total Environment* 713, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135061
- Dinelli E., L. A. (2012, January). Comparative Study Between Bottled Mineral and Tap Water in Italy. *Journal of Geochemical Exploration* 112, 368-389. doi: 10.1016/j.gexplo.2011.11.002
- Franks, M. L. (2019). The Influence of Water Composition on Flavor and Nutrient Extraction in Green and Black Tea. *Nutrients* 11(1): 80.
- Harmon D., G. M. (2018, October 28). Preference for Tap, Bottled, and Recycled Water: Relations to PTC Taste Sensitivity and Personality. *Appetite*(3672), 119-128. doi:10.1016/j.appet.2017.10.040.
- INEC, I. N. (2013). *Accesibilidad y uso del agua en los hogares ecuatorianos, por regiones naturales*. Quito: Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- INEN 1108, N. (2020). *Agua para consumo humano* (6.º rev.) *Requisitos*. Quito-Ecuador: INEN.

- INEN 1334-2. (2008). *Rotulado de productos alimenticios para consumo humano. Parte 2. Rotulado nutricional. Requisitos*. Quito: INEN.
- INEN ISO 9963-1. (2014). *Calidad del agua, determinación de la alcalinidad*. Quito.
- López et al. (2017). Effects of Sulfate and Nitrate on the Taste of Water: A Study with a Trained Panel. *Research and Technology AQUA*, 598-605.
- Nagpure et al. (2017). Physico-chemical Analysis of water Samples and Effect of its Quality on Human Health. *Life Science Informatics Publication*.
- NTE INEN 974. (2016). *Agua potable. Determinación de la dureza total por titulación con EDTA (1.º rev.)*. Quito: INEN.
- OMS, O. M. (2006). *Aspectos químicos (3.º ed.)*, Vol. 1. Suiza: Primer apéndice.
- Perry, K. Y. (2013, August). The Mineral Content of Tap Water in United States Households. *Journal of Food Composition and Analysis* 31(1), 46-50. doi: 10.1016/j.jfca.2013.03.004
- Platikanov S., G. V. (2013, February 1). Influence of Minerals on the Taste of Bottled and tap Water: A Chemometric Approach. *Water Research* 47, 47(2), 693-704. doi: 10.1016/j.watres.2012.10.040
- Rahman I., B. S. (2017). Quality Assessment of the Non-Carbonated Bottled Drinking Water Marketed in Bangladesh and Comparison with Tap Water. *Food Control*, 1149-1158. doi: 10.1016/j.foodcont.2016.10.032
- Salguero, L. G.-G.-L.-G. (2013). Training of Panellists for the Sensory Control of Bottled Natural Mineral Water in Connection with Water Chemical Properties. *Food Chemistry* 141(1), 625 -636. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.02.093
- Sancho, J. E. (2002). Pruebas de aceptación o hedónicas. *Introducción al análisis sensorial de los alimentos* (pp. 142-145). Barcelona, España: Alfaomega.
- Standard Methods 2120-B. (2012). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Standard Methods 2130-B. (2012). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Standard Methods 2160-C. (2012). *Standard Methods for the examination of Water and Wastewater* (22 ed.). Washington: American Public Health Association.
- Standard Methods 2510-B. (2012). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Standard Methods 3111-B. (2012). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Standard Methods 3500-Ca-B. (2012). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Standard Methods 3500-Mg-B. (2012). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Standard Methods 4500-Cl-B. (2012). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Standard Methods 4500-Cl-G. (2012). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Standard Methods 4500-H+-B. (2012). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Standard Methods 4500-NO3-B. (2012). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- Standard Methods 4500-SO4-E. (2012). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association.
- USEPA. (2020). *Secondary Drinking Water Standards: Guidance for Nuisance Chemicals*. Retrieved on 04-2020, from <https://bit.ly/2Z74F8Q>

- Villarroel, L. A. (2003). *Aplicación del análisis de componentes principales en el desarrollo de productos*. Cochabamba - Bolivia: UMSS.
- Vingerhoeds, M. (2017). Sensory Quality of Drinking Water Produced by Reverse Osmosis Membrane Filtration Followed by Remineralisation. *Water Research*, 42-51.
- Wang A., D. S. (2016, December). Effect of Iron on Taste Perception and Emotional Response of Sweetened Beverage under Different Water Conditions. *Food Quality and Preference* 54, 58-66. doi: 10.1016/j.foodqual.2016.06.016

Incremento de la termotransferencia en un sistema de enfriadores enchaquetados, optimizando los flujos de agua

(Heat transfer incremental on a jacketed coolers system through optimization of the water flowrates)

Andrés A. Sánchez-Escalona¹, Yanán Camaraza-Medina², Yoalbys Retirado-Mediaceja³, Ever Góngora-Leyva⁴

Resumen

En esta investigación se propuso un esquema optimizado de distribución de agua para incrementar la termotransferencia, en un sistema de enfriadores de sulfuro de hidrógeno. La instalación está compuesta por dos intercambiadores de calor de tubos y coraza enchaquetados, instalados en un arreglo serie-paralelo. Cada equipo opera con tres fluidos y posee dos vías principales de intercambio térmico. La optimización de los flujos de agua se realizó mediante algoritmos genéticos, utilizando un modelo con base en el método ϵ -NTU para la simulación de los intercambiadores de calor. Se estimó un incremento del calor transferido entre 3695 y 10514 W, así como una disminución de la temperatura del gas a la salida del sistema entre 2.9 y 9.8 K. La recuperación termoenergética calculada osciló entre 3.90 y 22.16 %, con 12.44 % como promedio. Mediante regresión lineal múltiple se determinaron las funciones para solución tecnológica del problema investigado.

Palabras clave

Algoritmos genéticos; eficiencia energética; intercambiadores de calor; optimización; uso racional del agua.

Abstract

This research proposed an optimized water distribution scheme in order to increase the heat transfer on a hydrogen sulphide gas coolers system. The system is comprised by two jacketed shell and tube heat exchangers, installed in a series-parallel arrangement. Each equipment operates with three streams, hence two major thermal communications are present. The water flowrates optimization was performed through genetic algorithms, using a model based on the ϵ -NTU method for simulation of the heat exchangers. The heat transfer incremental was estimated within the range 3695 to 10514 W, while the gas temperature reduction at the system outlet was projected between 2,9 and 9,8 K. Calculated heat recovery varied from 3,90 to 22,16%, averaging 12,44%. Multivariate linear regression was implemented for determination of the functions that solves the studied problem from a technological point of view.

Keywords

Genetic algorithms; energetic efficiency; heat exchangers; optimization; rational water usage.

1. Introducción

Comúnmente el agua y la energía están interrelacionadas dentro de un proceso. Si bien el uso mínimo de agua puede conllevar al ahorro de materias primas y del combustible utilizado para los procesos de calentamiento o enfriamiento, el suceso inverso también se manifiesta. Por consiguiente, los consumos de agua y energía deberían racionalizarse de forma simultánea. En este contexto, implementar alternativas para optimizar el uso de ambos recursos, cumpliendo

1 Universidad de Moa. Moa, Cuba. [sanchezescalona88@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9770-210X>]

2 Universidad de Matanzas. Matanzas, Cuba. [yanan.camaraza@umcc.cu, <https://orcid.org/0000-0003-2287-7519>]

3 Universidad de Moa. Moa, Cuba. [yretirado@ismm.edu.cu, <https://orcid.org/0000-0002-5098-5675>]

4 Universidad de Moa. Moa, Cuba. [egongora@ismm.edu.cu, <https://orcid.org/0000-0001-5418-5512>]

con las regulaciones ambientales, constituye un reto global para ingenieros e investigadores (Ahmetović, Ibrić, Kravanja y Grossmann, 2015; Lorenzo-Llanes, Zumalacárregui-de Cárdenas y Mayo-Abad, 2016). A pesar de que esta premisa parece incuestionable en la actualidad, siempre existen posibilidades de mejora en el ámbito industrial.

El sistema estudiado en el presente trabajo constituye un elemento clave en la gestión energética de la planta de procesos químicos donde se encuentra instalado. El mismo está compuesto por dos intercambiadores de calor de tubos y coraza enchaquetados, cuya función es enfriar el sulfuro de hidrógeno desde 416.15 hasta 310.15 K y separar el azufre arrastrado por la corriente de gas. Son equipos que operan con tres fluidos y poseen dos vías principales de intercambio de calor, ya que el aislamiento térmico externo limita la transferencia con el entorno. A pesar de que el sistema de enfriamiento se diseñó para transferir una energía térmica equivalente a 138 kW, a través de un área efectiva de 49.2 m², actualmente no se alcanza el intercambio térmico proyectado. De una parte, el flujo de agua alimentado representa solamente entre un 53.5 y 56.6 % del valor de diseño, equivalente a 2.974 kg/s (Sánchez-Escalona, Góngora-Leyva, Zalazar-Oliva y Álvarez-Hernández, 2017). Por otra parte, la distribución de los flujos de agua no es óptima porque limita la eficiencia del proceso de transferencia de calor. Como la carga térmica de cada etapa de intercambio es diferente, y en la mayoría de los escenarios de operación analizados el agua no es la resistencia térmica controlante, no tiene sentido práctico distribuir los flujos equitativamente en cada intercambiador de calor. Ello provoca que los equipos se subutilicen desde el punto de vista energético y se desaproveche potencia de bombeo en el sistema de suministro de agua.

Aunque varios investigadores han analizado la disposición óptima de las corrientes para intercambiadores de calor aislados (Gaddis, 1986; Kumar-Singh, 2015) y para corazas múltiples en serie (Mukherjee, 2004; Kotiaho, Lampinen y Assad, 2015; Guo, Cui, Huai, Cheng y Zhang, 2019), con el fin de mejorar la efectividad térmica del sistema, la mayor parte de la literatura solo hace referencia a configuraciones en paralelo y contracorriente de los fluidos. El arreglo combinado, serie-paralelo, ha sido poco estudiado. Mukherjee (2004) analizó este escenario mediante una situación real presentada en una refinería, con un sistema de enfriadores de hidrocarburo líquido, y propuso dividir el flujo de agua entre las corazas de la primera y la segunda etapa, en la misma proporción de sus cargas térmicas. La complejidad de este caso no fue notable, porque los equipos analizados solo poseían dos fluidos y una vía principal de intercambio de calor. Un estudio posterior fue realizado por Sánchez-Escalona y Góngora-Leyva (2019), relacionado también con la disposición serie-paralelo pero considerando tres fluidos, en el cual se estableció un procedimiento para el análisis térmico de los intercambiadores de calor, que permitió proponer mejoras a las instalaciones industriales existentes. Aunque recomendaron incrementar el flujo de agua a cada intercambiador de calor hasta 7.5 kg/s, con el propósito de lograr la temperatura requerida de salida del gas, la optimización de los flujos hacia cada sección del sistema se reservó para estudios posteriores.

Otro grupo de investigadores han empleado métodos de optimización y técnicas de intensificación de la transferencia de calor para incrementar el rendimiento térmico de los equipos (Sheikholeslami, Gorji-Bandpy y Ganji, 2015; Reyes-Rodríguez y Moya-Rodríguez, 2016; Toimil y Gómez, 2017; Alam y Kim, 2018). En este ámbito, cuando se estudian las mejoras de redes pre-existentes de intercambiadores de calor (HEN retrofit), se tienen en cuenta dos escenarios principales: estructura fija de la red, y modificación de la topología. Mediante la primera se persigue maximizar la recuperación de calor en la red utilizando superficies extendidas, insertos de cinta en espiral, deflectores helicoidales u otras técnicas. En cambio, mediante la segunda, se tienen

en consideración todas las posibilidades de modificación de la red, incluyendo cambios del área de transferencia y nueva disposición de los sistemas de tuberías. Aunque la modificación de la topología permite mejor aprovechamiento del agua y la energía, también implica mayores costos capitales (Jiang et al., 2018). Además, en plantas de producción continua, por lo general se dificulta realizar este tipo de modificaciones, incitando preferencia por la primera opción.

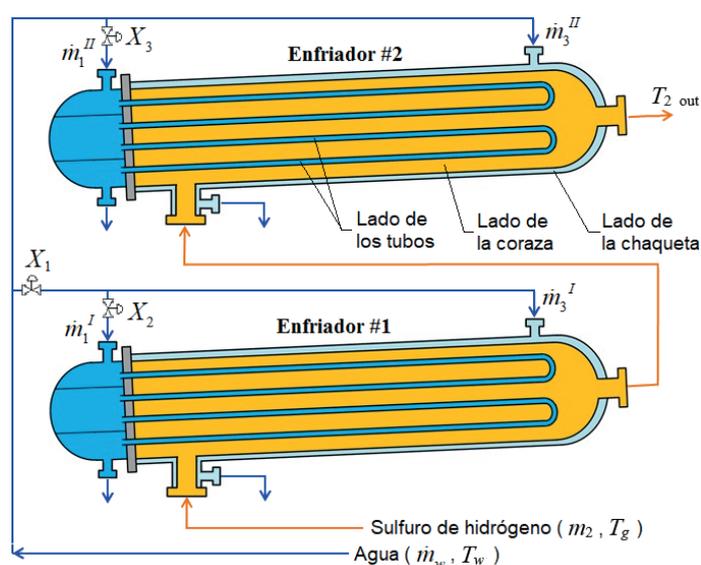
La mejora de redes preexistentes de intercambiadores de calor ha sido ampliamente estudiada. Dentro de los trabajos más recientes se encuentran los de desarrollados por Jiang et al. (2018), Bütün, Kantor, Mian y Maréchal (2018), Biyanto et al. (2019), Klemeš et al. (2020), entre otros. Sin embargo, en las referencias consultadas no se han analizado intercambiadores de calor con tres fluidos, ni se consideró la optimización de los flujos de las corrientes secundarias como uno de los métodos de intensificación de la transferencia de calor sin modificar la topología existente. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo consiste en proponer un esquema optimizado de distribución de agua a los intercambiadores de calor, que posibilite un aumento de la termotransferencia en el sistema de enfriadores de sulfuro de hidrógeno, manteniendo una estructura fija de la red. El enfoque presentado logra una solución factible y sencilla de un problema industrial.

2. Materiales y métodos

2.1. Metodología de optimización

El sistema de enfriamiento estudiado está compuesto por dos intercambiadores de calor de tubo y coraza enchaquetados, instalados en un arreglo serie-paralelo (flujo de gas en serie, y los de agua en paralelo). En cada uno de ellos el sulfuro de hidrógeno hace su recorrido del lado de la coraza en un paso, mientras que el agua circula del lado de los tubos, con cuatro pasos, y también por la chaqueta exterior (figura 1). Sus dos vías principales de intercambio de calor son: coraza-tubos y coraza-chaqueta. Los equipos operan ocho horas en modo de enfriamiento del gas, y luego se sacan de operación para suministrarle vapor (por el lado de los tubos y por la chaqueta), durante cuatro o seis horas con el objetivo de eliminar el azufre incrustado en su interior.

Figura 1. Esquema del sistema de enfriamiento analizado



La optimización de los flujos de agua en este sistema se realizó mediante algoritmos genéticos, utilizando un modelo basado en el método de la Efectividad - Número de Unidades de Transferencia (ϵ -NUT), para la simulación de los intercambiadores de calor. La metodología empleada constó de los siguientes pasos:

1. Diagnóstico termoenergético del objeto de estudio.
2. Selección de las variables y diseño experimental.
3. Modelación del sistema de intercambiadores de calor.
4. Validación del modelo.
5. Cálculo de las temperaturas de salida y la cantidad de calor transferida para el caso base (la operación actual).
6. Optimización de los flujos de agua mediante algoritmos genéticos.
7. Cálculo de las temperaturas de salida y la cantidad de calor transferida para el caso mejorado.
8. Comparación de los resultados.
9. Determinación de las funciones para solución tecnológica del problema investigado.

2.2. Selección de las variables y diseño experimental

Como variables del estudio se emplearon los parámetros operacionales que tienen un efecto notable en el proceso de intercambio térmico analizado. Por lo tanto, las variables independientes seleccionadas fueron las temperaturas de entrada de los fluidos, los flujos máscicos y el tiempo en operación, mientras que las variables dependientes consistieron en las temperaturas de salida de las tres corrientes. El tiempo en operación se incluyó como variable independiente, en este caso particular, debido a su influencia significativa en el factor de incrustaciones y, consecuentemente, su efecto negativo en el coeficiente global de transferencia de calor (Sánchez-Escalona y Góngora-Leyva, 2018). Los niveles de cada variable se obtuvieron a partir de los parámetros de trabajo del objeto de estudio.

Los cálculos se efectuaron destacando dos variables predictoras: flujo máscico de sulfuro de hidrógeno y tiempo en operación transcurrido. El resto de los parámetros se consideraron constantes, debido a su comportamiento estable durante el proceso productivo. El número de corridas se obtuvo mediante un diseño multifactorial 5^2 , de acuerdo con los niveles determinados para cada una de las variables, como muestra la tabla 1 (Edmonds y Kennedy, 2017).

Tabla 1. Matriz experimental establecida

Número de corridas	Valores de las variables independientes				
	Temperatura de entrada del agua (K)	Temperatura de entrada del gas (K)	Flujo total de agua (kg/s)	Flujo de gas (kg/s)	Tiempo en operación (h)
25	307.45	405.83	0.82	1.0227	0
				1.0565	2
				1.0903	4
				1.1241	6
				1.1579	8

2.3. Modelación matemática de los intercambiadores de calor

Uno de los aspectos más importantes para garantizar el éxito del proceso de optimización es la correcta formulación del modelo, ya que debe reflejar el problema real, con precisión suficiente para que los resultados tengan significación práctica (Biegler, 2014). En este contexto, para el cálculo de las temperaturas de salida de los tres fluidos que intervienen en el proceso de termotransferencia, se empleó el modelo analítico propuesto por Sánchez-Escalona y Góngora-Leyva (2018), incorporando algunas mejoras. Este modelo, representado de forma simplificada, mediante la expresión 1, se sustenta en la ecuación de la cantidad de calor transferida (según la Primera Ley de la Termodinámica), la ecuación de balance energético, así como las expresiones propias del método ϵ -NUT, particularizadas a intercambiadores de calor con tres fluidos y dos vías principales de intercambio térmico. Para ello se asumieron flujos monofásicos, propiedades termo-físicas constantes, a través del intercambiador de calor, operación en condiciones de estado estacionario y transferencia de calor nula hacia el medio ambiente.

$$\{T_{1\text{ out}}, T_{2\text{ out}}, T_{3\text{ out}}, Q\} = \phi(T_g, T_w, \dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, t, \text{propiedades termo-físicas}) \quad (1)$$

Donde: $T_{1\text{ out}}$ - temperatura de salida del agua del lado de los tubos (K); $T_{2\text{ out}}$ - temperatura de salida del gas que fluye por la coraza (K); $T_{3\text{ out}}$ - temperatura de salida del agua del lado de la chaqueta (K); Q - cantidad de calor total transferido en el intercambiador (W); T_g - temperatura de entrada del gas (K); T_w - temperatura de entrada del agua (K); \dot{m}_1 - flujo másico de agua del lado de los tubos (kg/s); \dot{m}_2 - flujo másico de gas (kg/s); \dot{m}_3 - flujo másico de agua del lado de la chaqueta (kg/s); t - tiempo en operación (h). Para este caso de estudio $T_{2\text{ in}} = T_g$ y $T_{1\text{ in}} = T_{3\text{ in}} = T_w$.

Las mejoras del modelo se introdujeron en los módulos de cálculo de los coeficientes individuales de transferencia de calor, y en la ecuación para determinar la cantidad de calor transferida (tabla 2).

Tabla 2. Mejoras implementadas sobre el modelo inicial

Parámetro	Modelo inicial	Modelo actual
Coefficiente individual del lado de los tubos	Correlaciones de Sieder y Tate (1936).	Ecuación de Sieder y Tate (1936), para flujo laminar, $Re \leq 2100$. Ecuación de Hausen (1943), rango $2100 < Re \leq 3 \cdot 10^3$. Ecuación de Gnielinski (1976), rango $3 \cdot 10^3 < Re \leq 10^4$. Ecuación de Petukhov (1970), rango $10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$.
Coefficiente individual del lado de la coraza	Método de Taborek (1983) para flujos monofásicos a través de corazas con deflectores simples segmentados.	Sin cambios.
Coefficiente individual del lado de la chaqueta	Correlación de Ghiwala & Matawala (2014), para flujo de agua a través de secciones anulares.	Ecuación de Gnielinski (1936) para flujo laminar, $Re \leq 2100$. Ecuación de Hausen (1983), en el rango $2100 < Re \leq 10^4$. Ecuación de Gnielinski (2015) para secciones anulares, $10^4 < Re$.
Cantidad de calor transferida en el intercambiador	$Q = Q_2$	$Q = \frac{1}{2}[Q_2 + (Q_1 + Q_3)]$

Donde: Re - número de Reynolds; Q_1 - cantidad de calor absorbida por el agua del lado de los tubos (W); Q_2 - cantidad de calor cedida por el gas (W); Q_3 - cantidad de calor absorbida por el agua del lado de la chaqueta (W).

2.4. Validación del modelo

Para validar el modelo se ejecutaron tres observaciones experimentales en días alternos, durante ocho horas, a partir de la puesta en funcionamiento de los intercambiadores de calor en modo de enfriamiento. Durante cada ciclo se ejecutaron 20 mediciones del flujo másico y las temperaturas de entrada y de salida de cada fluido, en ambos intercambiadores de calor, obteniéndose una base de datos con 120 registros. Instrumentación utilizada:

- Temperaturas: termopozos y termómetros bimetálicos industriales Ashcroft, con precisión de 0,1 K.
- Flujo de agua: caudalímetro ultrasónico Proline Prosonic Flow 93T, con precisión de $6.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.
- Flujo de sulfuro de hidrógeno: señal de proceso 4-20 mA que se envía a un PLC Siemens S7-400 y sistema Citect SCADA 7.10, con precisión 10^{-4} kg/s .

Los resultados predichos por el modelo se compararon con los valores de temperatura de salida medidos experimentalmente. Los parámetros estadísticos utilizados para cuantificar la precisión fueron el coeficiente de determinación (R^2), el error relativo promedio (e_{ave}) y el error relativo máximo (e_{max}), calculados mediante las ecuaciones 2-4 (Tamayo-Ávila et al., 2015; Li y Lu, 2018; Tuyen, Hap, y Phu, 2020).

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \right] \cdot 100\% \quad (2)$$

$$e_{ave} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (|T_i - T'_i| / T_i) \cdot 100\% \quad (3)$$

$$e_{max} = \max \left[\sum_{i=1}^n (|T_i - T'_i| / T_i) \right] \cdot 100\% \quad (4)$$

Donde: T - valor de temperatura medido experimentalmente (K); T' - valor de temperatura predicho por el modelo (K); i - valor i -ésimo de la muestra; n - cantidad total de observaciones efectuadas.

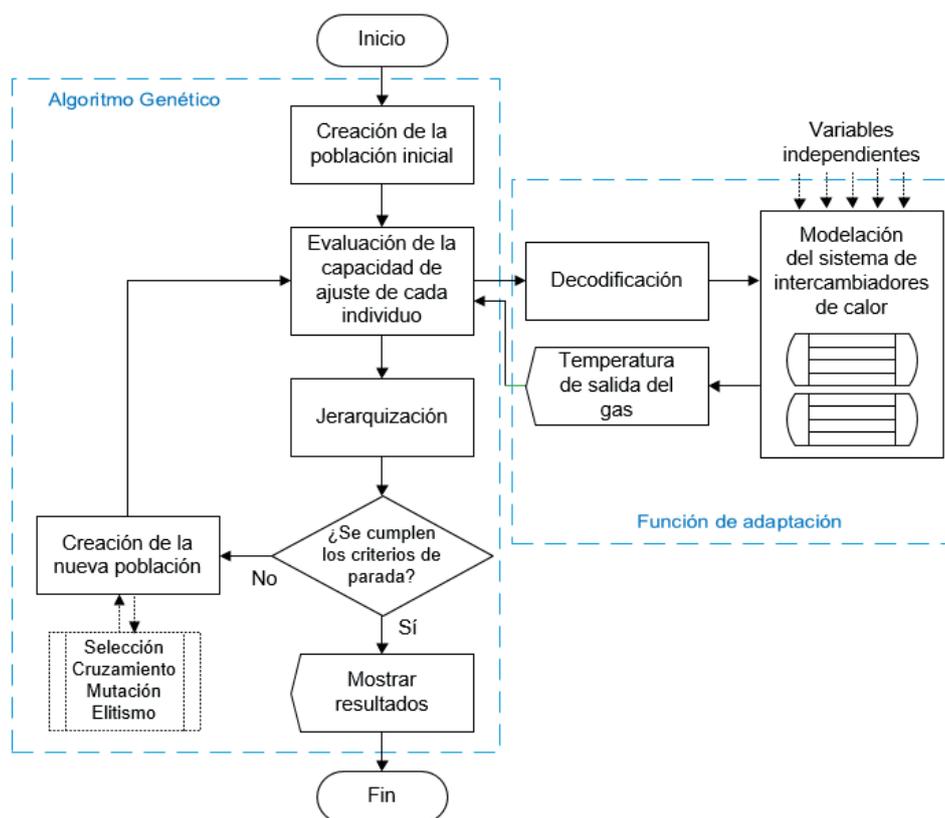
2.5. Algoritmo de optimización

Los elementos indispensables en la formulación de problemas de optimización incluyen el modelo matemático del sistema, una función objetivo (o función de adaptación), que cuantifique el criterio que será minimizado o maximizado; variables que se puedan emplear para la toma de decisiones y, opcionalmente, las restricciones (Biegler, 2014). En tal sentido, el presente trabajo empleó la lógica que muestra el esquema de la figura 2.

El proceso de optimización se realizó mediante algoritmos genéticos, por las ventajas que ofrece esta técnica estocástica de búsqueda iterativa, inspirada en los principios de selección natural. La solución del problema se realiza imitando los mecanismos de evolución de las especies, aplicando operadores genéticos básicos: selección, cruzamiento y mutación. Como concepto, un conjunto de individuos (población) cambia de generación en generación, sufriendo un proceso de evolución y adaptándose cada vez mejor al entorno. Su analogía matemática con-

siste en disponer de una función a maximizar o minimizar y una zona de búsqueda del elemento deseado, de manera que a cada punto del espacio de búsqueda le corresponde un valor de la función objetivo, y la meta es encontrar el punto que optimice dicha función (Reyes-Rodríguez y Moya-Rodríguez, 2016; Najarro, López, Racines y Puris, 2017; Moslemi y Keshtkar, 2018).

Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo de optimización



En la investigación se utilizaron funciones desarrolladas en Matlab® para efectuar la optimización. Los parámetros relacionados con la configuración del algoritmo se detallan a continuación (tabla 3).

Tabla 3. Configuración del algoritmo genético

Categoría	Parámetro	Valor
Variables	Cantidad	3
	Límite inferior	[0 0 0]
	Límite superior	[1 1 1]
Población	Tamaño de la población	100
Escalamiento	Función de escalamiento	Rango
Selección	Función de selección	Estocástica uniforme
Reproducción	Elitismo	1
	Fracción de cruzamiento	0.5
Mutación	Función de mutación	Dependiente de restricciones

Categoría	Parámetro	Valor
Cruzamiento	Función de cruzamiento	Dispersos
Migración	Fracción de migración	0.2
	Intervalo	20
Restricciones	Penalización inicial	10
	Factor de penalización	100
Criterios de parada	Generaciones	100
	Tiempo límite	∞
	Límite de ajuste	$-\infty$
	Generaciones recesivas	50
	Tiempo de retardo	∞
	Tolerancia de la función	10^{-6}
	Tolerancia de las restricciones	10^{-6}

Distribución de los flujos de agua en el enfriador 1 (etapa I):

$$\dot{m}_1^I = X_1 \cdot X_2 \cdot \dot{m}_w \quad (5)$$

$$\dot{m}_3^I = X_1 \cdot (1 - X_2) \cdot \dot{m}_w \quad (6)$$

Distribución de los flujos de agua en el enfriador 2 (etapa II):

$$\dot{m}_1^{II} = (1 - X_1) \cdot X_3 \cdot \dot{m}_w \quad (7)$$

$$\dot{m}_3^{II} = (1 - X_1) \cdot (1 - X_3) \cdot \dot{m}_w \quad (8)$$

$$X_k \in (0, 1) \mid \forall k \in \{1, 2, 3\}$$

Donde: \dot{m}_w - flujo total de agua alimentado al sistema de intercambiadores de calor, equivalente a 0.82 kg/s. Los superíndices I y II representan la primera y la segunda etapa de enfriamiento, respectivamente.

Desde el punto de vista práctico, el parámetro X_1 denota la fracción del flujo total de agua que se bombea hacia el primer enfriador, siendo $1 - X_1$ la fracción remanente hacia el segundo equipo. Por otra parte, X_2 representa la fracción del flujo de agua en el primer intercambiador que se hace fluir a través de los tubos, mientras que $1 - X_2$ constituye la porción que circula por la primera chaqueta. De forma análoga, X_3 describe la fracción que fluye por los tubos del segundo enfriador, y $1 - X_3$ la que circula por la segunda chaqueta. Para el caso base (la operación actual del sistema de enfriamiento), se comprobó experimentalmente que $X_1 = 0,500$ y $X_2 = X_3 = 0,723$, con tendencia invariable.

2.6. Funciones para solución tecnológica del problema investigado

Para correlacionar los flujos de agua óptimos hacia cada sección de los intercambiadores de calor, en función del flujo másico de sulfuro de hidrógeno y del tiempo en operación, se aplicó

un análisis de regresión lineal múltiple. El cálculo de los coeficientes en este modelo tuvo como base el método de mínimos cuadrados, debido a su conveniencia matemática y a la posibilidad de obtener expresiones explícitas de las ecuaciones de regresión (Bhattacharya y Burman, 2016). El análisis de la varianza, determinación de la bondad de ajuste y verificación de las hipótesis del modelo, se realizaron con el programa computacional Statgraphics.

3. Resultados y discusión

3.1. Modelación matemática

El sistema de enfriamiento de sulfuro de hidrógeno se estudió a partir de la matriz experimental diseñada. Los principales resultados obtenidos para el caso base se muestran a continuación (tabla 4).

Tabla 4. Resultados para el caso base

\dot{m}_2 (kg/s)	t (h)	X_1	X_2	X_3	\dot{m}_1^I (kg/s)	\dot{m}_3^I (kg/s)	\dot{m}_1^{II} (kg/s)	\dot{m}_3^{II} (kg/s)	$T_{2\ out}^I$ (K)	$T_{2\ out}^{II}$ (K)	Q_T (W)
1.0227	0	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	378.78	359.43	51523
	2	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	380.24	361.53	49187
	4	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	381.51	363.74	47130
	6	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	382.61	365.02	45309
	8	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	383.37	366.06	44146
1.0565	0	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	373.93	352.83	60798
	2	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	376.26	355.94	57225
	4	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	378.20	358.62	54156
	6	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	379.82	360.93	51498
	8	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	381.21	362.95	49175
1.0903	0	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	364.91	341.95	75672
	2	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	369.19	346.90	69780
	4	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	372.55	351.07	64840
	6	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	375.24	354.58	60671
	8	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	377.44	357.57	57125
1.1241	0	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	355.06	330.79	91718
	2	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	355.09	331.85	90414
	4	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	361.54	338.36	82424
	6	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	366.77	344.08	75405
	8	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	370.79	348.87	69539
1.1579	0	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	354.85	330.66	94640
	2	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	355.38	331.15	94022
	4	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	355.83	331.58	93474
	6	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	356.06	331.75	93266
	8	0.500	0.723	0.723	0.296	0.114	0.296	0.114	357.15	334.02	90396

Por otra parte, al optimizar los flujos de agua hacia cada sección del sistema de intercambiadores de calor, mediante algoritmos genéticos, se obtuvieron los valores de temperaturas de salida y cantidad de calor transferida para el caso mejorado (tabla 5).

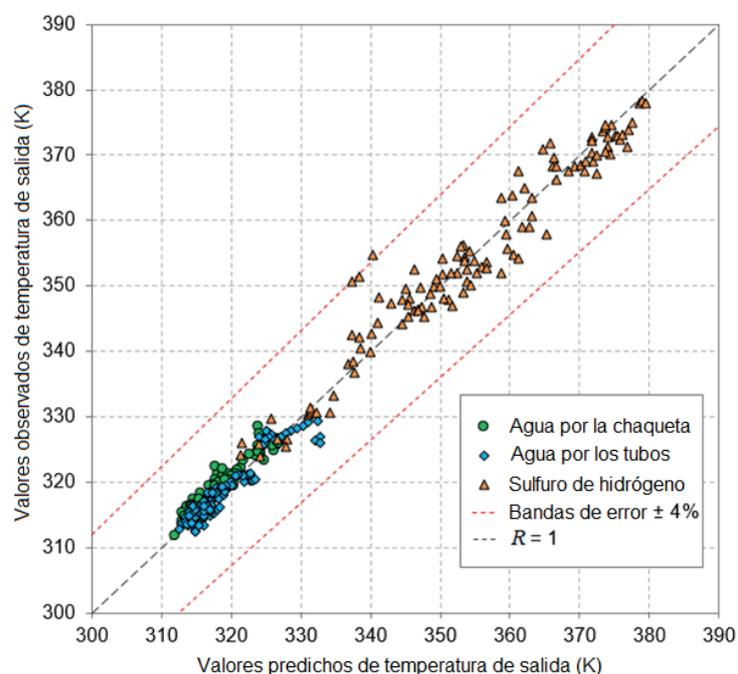
Tabla 5. Resultados para el caso mejorado

\dot{m}_2 (kg/s)	t (h)	X_1	X_2	X_3	\dot{m}_1^I (kg/s)	\dot{m}_3^I (kg/s)	\dot{m}_1^{II} (kg/s)	\dot{m}_3^{II} (kg/s)	$T_{2\ out}^I$ (K)	$T_{2\ out}^{II}$ (K)	Q_T (W)
1.0227	0	0.504	0.218	0.198	0.090	0.323	0.081	0.326	371.77	350.16	61832
	2	0.502	0.182	0.171	0.075	0.337	0.070	0.339	373.31	352.10	59667
	4	0.503	0.153	0.137	0.063	0.349	0.056	0.352	374.64	353.99	57572
	6	0.497	0.110	0.117	0.045	0.363	0.048	0.364	376.55	356.05	55277
	8	0.500	0.084	0.081	0.034	0.376	0.033	0.377	377.91	358.29	52783
1.0565	0	0.498	0.288	0.285	0.118	0.291	0.117	0.294	368.00	345.17	69619
	2	0.496	0.252	0.258	0.102	0.304	0.107	0.307	370.08	347.61	66810
	4	0.498	0.224	0.223	0.091	0.317	0.092	0.320	371.75	349.82	64267
	6	0.504	0.202	0.183	0.083	0.330	0.074	0.332	373.05	351.86	61913
	8	0.497	0.159	0.163	0.065	0.343	0.067	0.345	374.87	353.80	59689
1.0903	0	0.494	0.361	0.369	0.146	0.259	0.153	0.262	361.25	337.43	81053
	2	0.513	0.356	0.31	0.150	0.271	0.124	0.276	363.80	341.18	76580
	4	0.496	0.301	0.304	0.122	0.284	0.126	0.288	367.31	344.26	72927
	6	0.506	0.283	0.259	0.117	0.297	0.105	0.300	369.10	346.97	69707
	8	0.498	0.240	0.239	0.098	0.310	0.098	0.313	371.40	349.36	66863
1.1241	0	0.672	0.589	0.895	0.325	0.226	0.241	0.028	344.15	327.28	96037
	2	0.701	0.584	0.886	0.336	0.239	0.217	0.028	343.55	328.32	94755
	4	0.680	0.548	0.864	0.306	0.252	0.227	0.036	351.31	334.43	87248
	6	0.678	0.523	0.841	0.291	0.265	0.222	0.042	356.81	339.67	80813
	8	0.660	0.491	0.818	0.266	0.275	0.228	0.051	361.69	344.30	75141
1.1579	0	0.646	0.634	0.897	0.336	0.194	0.260	0.030	345.28	327.75	98335
	2	0.653	0.613	0.899	0.328	0.207	0.256	0.029	345.39	327.93	98100
	4	0.668	0.599	0.897	0.328	0.220	0.244	0.028	345.26	328.14	97836
	6	0.670	0.576	0.897	0.316	0.233	0.243	0.028	345.56	328.35	97578
	8	0.698	0.570	0.882	0.326	0.246	0.218	0.029	346.15	330.47	94884

Donde: $T_{2\ out}^I$ - temperatura del gas a la salida del primer enfriador (K); $T_{2\ out}^{II}$ - temperatura del gas a la salida del segundo enfriador (K); Q_T - cantidad de calor total transferida en el sistema, incluyendo ambas etapas (W).

La precisión del modelo analítico utilizado para simular el desempeño térmico de los intercambiadores de calor, garantizó confiabilidad de los resultados. Al comparar las predicciones con los valores de temperatura de salida medidos experimentalmente se observó fuerte grado de asociación entre las variables y bajos índices de error (figura 3).

Figura 3. Validación del modelo



Las mejoras al modelo inicial publicado por Sánchez-Escalona & Góngora-Leyva (2018), introducidas en este estudio, posibilitaron incrementar la correlación y reducir ligeramente las desviaciones (tabla 6).

Tabla 6. Comparación de los modelos

Variable	Modelo actual			Modelo inicial		
	R^2	e_{ave}	e_{max}	R^2	e_{ave}	e_{max}
$T_{1\ out}$	90.2%	0.34%	2.03%	88.7%	0.36%	2.66%
$T_{2\ out}$	94.3%	0.76%	4.10%	93.4%	0.78%	5.32%
$T_{3\ out}$	91.2%	0.33%	1.36%	91.2%	0.33%	1.36%

3.2. Comparación del caso mejorado con el caso base

Operar con flujos de agua estables y balanceados hacia las diferentes secciones del sistema de intercambiadores de calor, impide alcanzar mayores niveles de eficiencia térmica. Como los dos intercambiadores poseen el mismo tamaño y capacidad, la coraza más caliente entrega mayor carga térmica que la otra, en virtud de una mayor diferencia media de temperaturas (Mukherjee, 2004; Sánchez-Escalona y Góngora-Leyva, 2017). Esto provoca que el agua de enfriamiento, bombeada al intercambiador de calor de la primera etapa, absorba más calor y de cierta manera se subutilice la capacitancia térmica de la corriente de agua a través de la segunda etapa.

Además, como el agua no es el fluido controlante, cualquier exceso de flujo solo tendrá una influencia imperceptible en los coeficientes globales de transferencia de calor.

Teniendo esto en consideración, los valores óptimos de termotransferencia se estimaron para flujos de agua variables, que deben ajustarse en función del nivel productivo de sulfuro de hidrógeno y del tiempo en operación transcurrido. El hecho de que la transferencia óptima de energía térmica dependa de flujos de agua variables, también obedece al uso de intercambiadores de calor con más de una vía de intercambio térmico, ya que la efectividad máxima solo se alcanza cuando la sumatoria de todas las cantidades de calor transferido sea superior. Bajo estas circunstancias, las corrientes de agua pueden dividirse coordinadamente hacia las diferentes secciones de los intercambiadores de calor, abasteciendo con mayor flujo a la vía de intercambio de calor, que ofrece menor resistencia térmica. En este caso de estudio, las resistencias térmicas controlantes son el coeficiente individual de transferencia de calor del lado de la coraza y el factor de incrustaciones, por lo que estas definen la matriz de distribución de los flujos de agua.

El esquema de optimización propuesto permite incrementar la cantidad de calor transferida entre 3695 y 10514 W (figura 4). Consecuentemente, se logra disminuir la temperatura del gas a la salida del sistema de enfriamiento entre 2.9 y 9.8 K (figura 5). Este hecho no solo favorece un uso racional del agua, sino también un mejor aprovechamiento de la potencia de bombeo y, por consiguiente, un uso más eficiente de la energía eléctrica generada. El impacto primario de esta mejora, en materia de utilización de recursos, consiste en lograr que se transfiera una mayor cantidad de energía térmica sin la necesidad de incrementar el flujo total de agua de enfriamiento, que es bombeado a través del sistema de intercambiadores de calor.

Según Jiang et al. (2018), cuando se aplican técnicas de mejora de las redes de intercambiadores de calor (HEN *retrofit*), imponiendo estructura fija de la red (uso de superficies extendidas, insertos de cinta en espiral, deflectores helicoidales, etc.), la recuperación termoenergética puede elevarse hasta un 7.69 %. En el presente caso de estudio se determinaron niveles de recuperación comparables, que oscilan entre 3.90 y 22.16 %, con 12.44 %, como promedio.

Figura 4. Incremento de la transferencia de calor después de la optimización

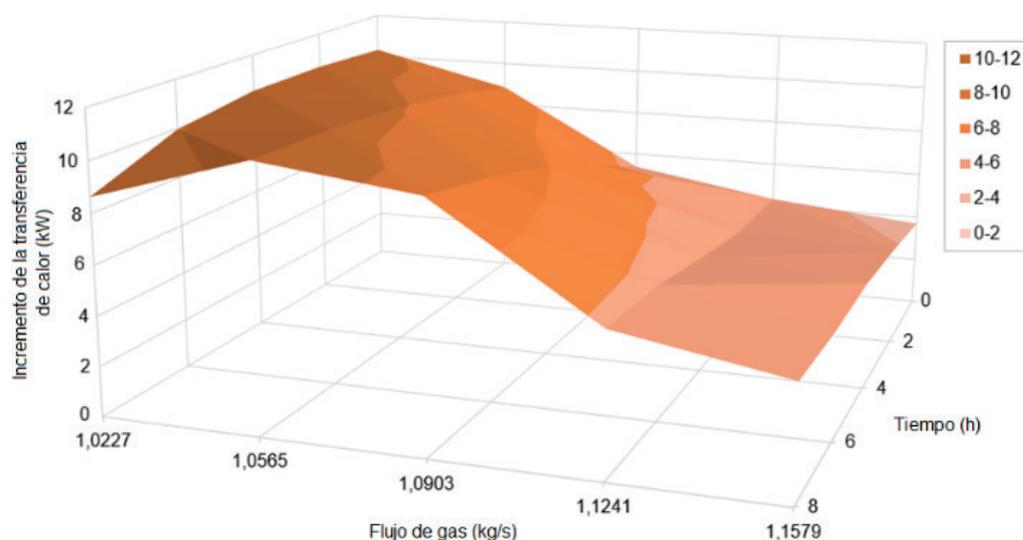
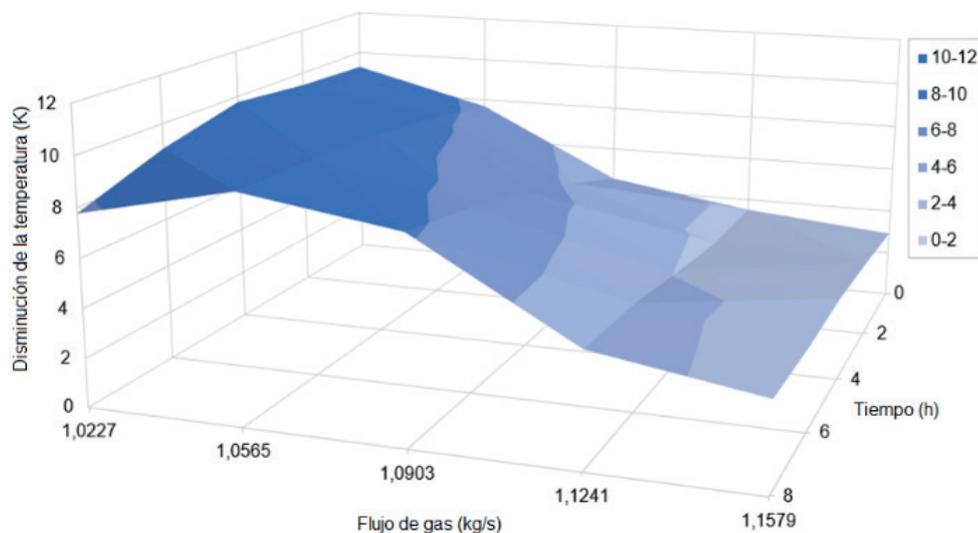


Figura 5. Disminución de la temperatura del gas a la salida después de la optimización



3.3. Propuesta de funciones para la implementación práctica

Los flujos de agua óptimos, hacia cada sección de los intercambiadores de calor, se correlacionaron con el flujo másico de sulfuro de hidrógeno y el tiempo en operación, como muestran las ecuaciones 9-12:

$$\dot{m}_1^I = -1,869 + 1,91775 \cdot \dot{m}_2 - 0,00858 \cdot t \quad (9)$$

$$\dot{m}_3^I = 1,44632 - 1,08935 \cdot \dot{m}_2 - 0,00426 \cdot t \quad (10)$$

$$\dot{m}_1^{II} = -1,24361 + 1,30237 \cdot \dot{m}_2 - 0,00559 \cdot t \quad (11)$$

$$\dot{m}_3^{II} = 2,48799 - 2,13195 \cdot \dot{m}_2 - 0,00981 \cdot t \quad (12)$$

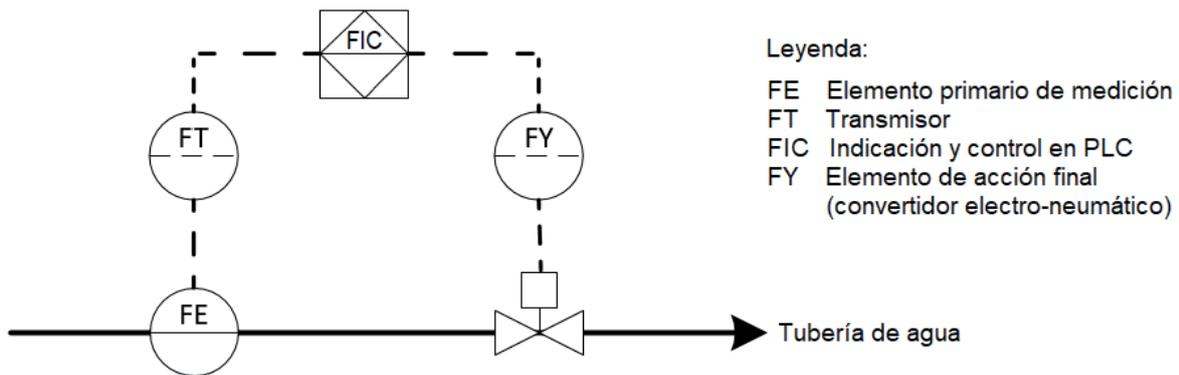
Al ajustar los modelos de regresión lineal múltiple se caracterizó la significancia estadística de cada función, determinándose una correlación moderada-fuerte (tabla 7). Como el valor-P resultante de los análisis de varianza fue menor que 0.05 en todos los casos, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95 %.

Tabla 7. Caracterización de los ajustes de regresión

Parámetro	Función de regresión			
	\dot{m}_1^I	\dot{m}_3^I	\dot{m}_1^{II}	\dot{m}_3^{II}
Coefficiente de correlación R	0.8783	0.7819	0.8547	0.7652
Error estándar de las estimaciones	0.0550	0.0454	0.0416	0.0947
Error absoluto medio	0.0382	0.0178	0.0268	0.0660
Estadístico Durbin-Watson	1.7128	2.1955	2.1963	1.8360

A partir de estos resultados se propone instalar una válvula automática con lazo de control de flujo (figura 6), en cada ramal de las tuberías de agua, hacia los intercambiadores de calor, incorporando las funciones obtenidas en un autómata programable (PLC) Siemens S7-400 disponible en la planta.

Figura 6. Esquema del lazo de control de flujo propuesto



Este sistema permite mejorar el intercambio térmico manteniendo constante el flujo total de agua, porque se fundamenta en una distribución inteligente y dinámica de los caudales hacia las diferentes secciones de los intercambiadores de calor, sin tener que modificar el sistema de bombeo existente. En investigaciones precedentes sobre el mismo objeto de estudio (Sánchez-Escalona y Góngora-Leyva, 2019) se recomendó incrementar el flujo de agua a cada equipo, sin optimizar su distribución, pero ello implicaría continuar operando de modo menos eficiente, y demandaría la sustitución de todo el sistema de bombeo y suministro de agua por otro de mayor caudal, con costos más elevados.

4. Conclusiones

Se propuso un esquema optimizado de distribución de agua a los intercambiadores de calor (manteniendo constante el flujo total alimentado al sistema, $m_w = 0.82$ kg/s), que mejora la eficiencia térmica del sistema de enfriamiento de sulfuro de hidrógeno sin realizar modificaciones constructivas importantes en la red. La solución del problema de optimización se desarrolló satisfactoriamente, empleando algoritmos genéticos. El modelo utilizado para la simulación de los intercambiadores de calor se considera confiable, a partir de los valores de los parámetros estadísticos calculados: coeficiente de determinación ascendente a 94.3 %, y error relativo máximo equivalente a 4.1 %.

Los valores óptimos de termotransferencia se estimaron para flujos de agua variables, determinados en función del flujo másico de sulfuro de hidrógeno y del tiempo en operación. Se estimó un incremento del calor transferido entre 3695 y 10514 W, así como una disminución de la temperatura del gas a la salida del sistema entre 2.9 y 9.8 K. La recuperación termoenergética calculada osciló entre 3.90 y 22.16%, con 12.44 % como promedio. El trabajo aporta una solución tecnológica del problema investigado, que consiste en la instalación de válvulas automáticas con lazos de control de flujo gobernados desde un PLC.

Las oportunidades futuras de investigación deberían enfocarse en el empleo de otras técnicas de regresión, para mejorar la bondad de ajuste de las funciones que correlacionan los flu-

jos de agua óptimos con el flujo de sulfuro de hidrógeno y el tiempo en operación. También podría estimarse el impacto económico que introduce un proceso de transferencia de calor más eficiente, que a su vez implica un mejor aprovechamiento de la potencia de bombeo de agua.

Referencias

- Ahmetović, E.; Ibrić, N.; Kravanja, Z. y Grossmann, I. E. (2015). Water and Energy Integration: A Comprehensive Literature Review of Non-isothermal Water Networks Synthesis. *Computers and Chemical Engineering* 82, pp. 144-171. doi: 10.1016/j.compchemeng.2015.06.011
- Alam, T. y Kim, M-H. (2018). A Comprehensive Review on Single Phase Heat Transfer Enhancement Techniques in Heat Exchangers Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, pp. 813-839. doi: 10.1016/j.rser.2017.08.060
- Bhattacharya, P. K. y Burman, P. (2016). *Theory and Methods of Statistics*. Oxford, Reino Unido: Academic Press (imprint of Elsevier). doi: 10.1016/B978-0-12-802440-9.00012-6
- Biegler, L. T. (2014). Recent Advances in Chemical Process Optimization. En *Chemie Ingenieur Technik* 86(7), pp. 1-11. doi: 10.1002/cite.201400033
- Biyanto, T. R.; Tama, N. E.; Permatasari, I. et al. (2019). Optimization Heat Transfer Coefficient in Retrofit Heat Exchanger Network Using Pinch Analysis and Killer Whale Algorithm. *AIP Conference Proceedings*, 2088-020051. doi: 10.1063/1.5095303
- Bütün, H.; Kantor, I.; Mian, A. y Maréchal, F. (2018). A Heat Load Method for Retrofitting Heat Exchanger Networks. *28th European Symposium on Computed Aided Process Engineering*, Graz, Austria. Junio 10-13. doi: 10.1016/B978-0-444-64235-6.50244-8
- Edmonds, W. A. y Kennedy, T. D. (2017). *An Applied Guide to Research Designs: Quantitative, Qualitative, and Mixed Methods* (2ª ed.), Los Angeles, Estados Unidos: SAGE Publications.
- Gaddis, E. S. (1986). Shell and Tube Heat Exchangers with Segmental Baffles. En Schlünder, E. U. (ed.), *Heat Exchangers Design Handbook*. Londres, Reino Unido: Hemisphere Publishing.
- Ghiwala, T. M. y Matawala, V. K. (2014). Sizing of Triple Concentric Pipe Heat Exchanger. *International Journal of Engineering Development and Research* 2(2), pp. 1683-1692.
- Gnielinski, V. (1976). New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow. *International Chemical Engineering* 16(2), pp. 359-368.
- Gnielinski, V. (2015). Turbulent Heat Transfer in Annular Spaces – A New Comprehensive Correlation. *Heat Transfer Engineering* 36(9), pp. 787-789. doi: 10.1080/01457632.2015.962953
- Guo, J.; Cui, X.; Huai, X.; Cheng, K. y Zhang, H. (2019). The Coordination Distribution Analysis on the Series Schemes of Heat Exchanger System. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 129, pp. 37-46. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.068
- Hausen, H. (1943). Darstellung des Wärmeüberganges in Rohren durch Verallgemeinerte Potenzbeziehungen. *VDIZ* 4, pp. 91.
- Hausen, H. (1983). *Heat Transfer in Counter Flow, Parallel Flow and Cross Flow*. Boston, Estados Unidos: McGraw Hill.
- Jiang, N.; Han, W.; Guo, F. et al. (2018). A Novel Heat Exchanger Network Retrofit Approach Based on Performance Reassessment. *Energy Conversion and Management* 177, pp. 477-492. doi: 10.1016/j.econman.2018.10.001
- Klemeš, J. J.; Wang, Q-W.; Varbanov, P. S. et al. (2020). Heat Transfer Enhancement, Intensification and Optimisation in Heat Exchanger Network Retrofit and Operation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120, pp. 109644. doi: 10.1016/j.rser.2019.109644
- Kotiaho, V. W.; Lampinen, M. J. y Assad, E. H. (2015). Effect of Heat Exchanger Connection on Effectiveness. *Journal of Robotics and Mechanical Engineering Research* 1(1), pp. 11-17. <https://bit.ly/2Z7YAsl>

- Kumar-Singh, S. (2015). Thermal Design Guidelines for Optimizing Shell-and-tube Heat Exchangers. *Chemical Engineering* 122(2), pp. 54-57. <https://bit.ly/32Y4Sw7>
- Li, L. y Lu, Z. (2018). A New Method for Model Validation with Multivariate Output. *Reliability Engineering & System Safety* 169, pp. 579-592. doi: 10.1016/j.ress.2017.10.005
- Lorenzo-Llanes, J.; Zumalacárregui-de-Cárdenas, L. y Mayo-Abad, O. (2016). Integración simultánea de agua y energía: logros y desafíos. *Centro Azúcar* 43(1), pp. 37-50. <https://bit.ly/358pLr8>
- Moslemi, H. R. y Keshtkar, M. M. (2018). Sensitivity Analysis and Thermal Performance of Evacuated U-Tube Solar Collector Using Genetic Algorithm. *International Journal of Heat and Technology* 36(4), pp. 1193-1202. doi: 10.18280/ijht.360406
- Mukherjee, E. (2004). *Practical Thermal Design of Shell-and-Tube Heat Exchangers*. Nueva York, Estados Unidos: Begell House Inc.
- Najarro, R.; López, R; Racines, R. U. y Puris, A. (2017). Un algoritmo genético híbrido para la optimización del Flow Shop Scheduling bajo restricciones de entornos reales. *Enfoque UTE* 8(5), pp. 14-25. doi: 10.29019/enfoqueute.v8n5.176
- Petukhov, B. S. (1970). "Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties. En Hartnett, J. P. y Irvine, T. F. (eds.), *Advances in Heat Transfer* 6, pp. 503-564. Nueva York, Estados Unidos: Academic Press.
- Reyes-Rodríguez, M. B. y Moya-Rodríguez, J. L. (2016). Design and Optimization of Shell and Tube Heat Exchangers, State of the Art. *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications* 2(6), pp. 4-27. doi: 10.5935/2447-0228.20160011
- Sánchez-Escalona, A. A.; Góngora-Leyva, E.; Zalazar-Oliva, C. y Álvarez-Hernández, E. (2017). Análisis del intercambio de calor e incrustaciones en un sistema de enfriadores de ácido sulfhídrico. *Minería & Geología* 33(3), pp. 326-340. <https://bit.ly/2Fa8ZNY>
- Sánchez-Escalona, A. A. y Góngora-Leyva, E. (2018). Artificial Neural Network Modeling of Hydrogen Sulphide Gas Coolers Ensuring Extrapolation Capability. *Mathematical Modelling of Engineering Problems* 5(4), pp. 348-356. doi: 10.18280/mmep.050411
- Sánchez-Escalona, A. A. y Góngora-Leyva, E. (2019). Improvements to the Heat Transfer Process on a Hydrogen Sulphide Gas Coolers System. *International Journal of Heat and Technology* 37(1), pp. 249-256. doi: 10.18280/ijht.370130
- Sheikholeslami, M.; Gorji-Bandpy, M. y Ganji, D. D. (2015). Review of Heat Transfer Enhancements Methods: Focus on Passive Methods Using Swirl Flow Devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49, pp. 444-469. doi: 10.1016/j.rser.2015.04.113
- Sieder, E. N. y Tate, G. E. (1936). Heat Transfer and Pressure Drop of Liquids in Tubes. *Industrial and Engineering Chemistry* 28(12), pp. 1429-1435.
- Tamayo-Ávila, I.; Pazmiño-Bravo, L. G.; Valencia-Alvear, D. F.; Galván-Paredes, M. M. y Batista-Zaldívar, M. A. (2015). Implementación de prácticas de laboratorio con costo mínimo, *Enfoque UTE* 6(2), pp. 44-58. doi: 10.29019/enfoqueute.v6n2.59
- Taborek, J. (1983) Shell-and-tube Heat Exchangers: Single Phase Flow. En Schlünder, E. U. (ed.), *Heat Exchanger Design Handbook*. Nueva York, Estados Unidos: Hemisphere Publishing Corporation.
- Toimil, D. y Gómez, A. (2017). Review of metaheuristics applied to heat exchanger network design. *International Transactions in Operational Research* 24, pp. 7-26. doi: 10.1111/itor.12296
- Tuyen, V.; Hap, N. V. y Phu, N. M. (2020). Thermal-hydraulic Characteristics and Optimization of a Liquid-to-suction Triple-tube Heat Exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering* 19, pp. 100635. doi: 10.1016/j.csite.2020.100635

Características de la arena sílica de Alvarado, Veracruz, México, como material para barreras reactivas permeables, para la remediación de acuíferos contaminados con lixiviados de basureros no controlados

(Characteristics of Silica Sand from Alvarado, Veracruz, Mexico as material for Permeable Reactive Barriers for the Remediation of Aquifers contaminated with leachates from uncontrolled landfills)

Manuel Alberto Susunaga-Miranda¹, Bertha María Estévez-Garrido²,
Rodrigo Manuel Susunaga-Estévez³

Resumen

En este artículo se caracteriza la arena sílica de las costas del municipio de Alvarado, Veracruz, México, y se compara sus propiedades con los materiales usados en las barreras reactivas permeables, para permitir su uso, como una solución de remediación de acuíferos contaminados con lixiviados de basureros no controlados. Esto se logra mediante análisis granulométrico, determinación de humedad y concentración de sílice y hierro, con lo cual se obtienen partículas con tamaño de 0.707 mm, humedad relativa de 0.52 % y concentración de SiO_2 y de Fe_2O_3 87.38 % y 2.72 % respectivamente, lo que, al comparar con materiales reactivos en uso, cumple con los criterios para ser usado como barrera para la remediación de acuíferos con lixiviados.

Palabras clave

Arena Sílica, Barreras Reactivas Permeables, Basureros, Remoción de contaminantes, granulometría, materiales reactivos

Abstract

This article characterizes the silica sand from the coasts of the municipality of Alvarado, Veracruz, Mexico and compares its properties with the materials used for the Permeable Reactive Barriers and that allow its use as a solution for the remediation of aquifers contaminated with leachate from uncontrolled landfills, by granulometric analysis, determination of humidity and concentration of Silica and Iron, obtaining particles with a diameter of 0.707 mm, relative humidity of 0.52% and concentration of SiO_2 and Fe_2O_3 87.38% and 2.72% respectively, which comparing with reactive materials in use meets the criteria to be used as a Barrier for the Remediation of Aquifers contaminated with leachates

Keywords

Silica Sand, Permeable Reactive Barriers, Dumpsites, contamination removal, particle size, reactive materials

1. Introducción

El incremento de la población junto con la agricultura y las actividades industriales, han generado un aumento en la demanda de agua para consumo humano y, ante la escasez de la misma, a

1 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz. Veracruz, México. [manuel.sm@veracruz.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5595-0914>]

2 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz. Veracruz, México. [bertha.eg@veracruz.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-8543-3520>]

3 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz. Veracruz, México. [L19020931@veracruz.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6570-9307>]

nivel superficial en algunos lugares o debido a su contaminación, la preservación de este recurso en el subsuelo tiene una gran importancia. Si bien el agua subterránea representa solo un pequeño porcentaje de los recursos hídricos totales en la Tierra, su contribución es vital, teniendo en cuenta que hasta dos mil millones de personas dependen directamente de los acuíferos para el agua potable y el 40 % de los alimentos del mundo es producido por la agricultura de regadío, que depende en gran medida de aguas subterráneas (Thiruvengkatachari et al. 2008).

Una de las principales fuentes de contaminación de los acuíferos subterráneos está relacionado con la disposición de residuos sólidos urbanos (RSU), los cuales generan un líquido lixiviado, que se forma por una parte por la percolación del agua de lluvia y de la infiltración del nivel freático, y por la otra, por la descomposición anaeróbica de los residuos (Susunaga y Estévez, 2018), cuya composición depende de la naturaleza de los desechos y de los procesos químicos y bioquímicos de transformación de la materia y sus características fundamentales cambian con el paso del tiempo (Naveen et al., 2017, con componentes altamente peligrosos, como compuestos aromáticos, halogenados, fenoles, pesticidas, metales pesados y amoníaco).

Cuando los residuos sólidos terminan en un basurero no controlado, se genera el lixiviado, cuya cantidad se ve afectada principalmente por las precipitaciones, la evapotranspiración, la escorrentía superficial, la infiltración de agua subterránea y el grado de compactación de los desechos (Miao et al., 2019), lo cual migra con el agua por efecto de la gravedad, afectando la calidad de las aguas superficiales y de los acuíferos subterráneos (Teta & Hikwa, 2017), y eventualmente, llegarían por medio de las descargas de los ríos al mar, lo que pone en peligro la biota acuática (Susunaga y Estévez, 2018).

A medida que los lixiviados se acumulan en el acuífero, la extensión de la contaminación se ve afectada por factores ambientales, como la precipitación, la tasa de contaminación, la geología del sitio, su permeabilidad y régimen de flujo de aguas subterráneas (Han et al., 2016). El tratamiento de las aguas subterráneas contaminadas y la recuperación de los acuíferos suele ser una de las tareas de complejidad elevada y alto costo económico, que depende entre otras cosas de las características hidrogeológicas del emplazamiento, del tipo de contaminante y del grado de afectación de la zona (Chimeno & Navarro, 2002).

En los sitios de disposición final de los residuos sólidos urbanos ya sean rellenos sanitarios, basureros controlados o tiradero a cielo abierto (NOM-083-SEMARNAT-083, 2004), uno de los principales problemas es el control de los lixiviados, ya que esto implica mantener su flujo dentro de los mismos sitios y darles un tratamiento adecuado. Sin embargo, en el 2010, en el 15 % de estos sitios, se escapaban a diario ocasionando contaminación de fuentes de agua y suelos. Ya para el año 2011, en la región centro occidente de México (donde se incluye al estado de Veracruz), el 46 % de los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos no contaban con fosas o lagunas para captar lixiviados; además, el 61 % de estos no tenía instaladas geomembranas, por lo tanto la contaminación escurre pendiente abajo hacia los acuíferos subterráneos (Bernaché, 2012).

Las barreras reactivas permeables (BRP) constituyen una técnica de tratamiento de aguas subterráneas in situ, que consiste en la interceptación del flujo del agua subterránea para reducir o transformar los contaminantes presentes en ella (Striegel et al., 2001, Yin et al., 2017), entre los que se encuentran los metales pesados y los compuestos clorados (Maitra, 2019). La principal ventaja de las BRP sobre los métodos ex situ u otros métodos in situ de remediación de aguas subterráneas, es la naturaleza pasiva del tratamiento. Es decir, en su mayor parte, su funcionamiento no depende de mano de obra externa o insumos de energía. Una vez instalada,

la barrera aprovecha el flujo de agua subterránea in situ para que los contaminantes entren en contacto con los medios reactivos llenados (Liu et al., 2011).

Los materiales de las BRP eliminan los contaminantes disueltos del agua subterránea, mediante la inmovilización dentro de la barrera o la transformación a productos menos nocivos, a través de mecanismos que incluyen la adsorción y precipitación, la reacción química y las reacciones biológicas (Scherer et al., 2000). Entre los materiales que han sido probados, el desarrollo de las barreras reactivas permeables se encuentran, la zeolita natural, zeolita modificada con hierro, apatita, apatita concentrada, caolín y bentonita cruda han (Vukojević et al., 2017), ceniza de carbón, caolinita, cáscara de coco (Asokbunyarat y Annachhatre 2017), pirita, hierro granular (Maitra, 2019), arcillas (Segura et al., 2015), y de algún modo la arena sílica, que se ha utilizado como parte de una mezcla con escoria y alúmina activada (McRae, 1999). Estos materiales en su mayoría tienen una alta capacidad para el intercambio de cationes, y crean una carga neta negativa mediante la sustitución de cationes de valencia inferior (por ejemplo, Al^{3+}), con un catión de mayor valencia (por ejemplo, Si^{4+}), dentro de la estructura mineral (Bohn, 1985). En México se ha comprobado que arcillas modificadas o activadas presentan una eficiencia de remoción de Cr^{+6} hasta del 95.37 % y que son un material eficiente para control de lixiviados de tiraderos a cielo abierto (Segura et al 2015).

Las cenizas volantes y cenizas de fondo, cuyo contenido principal son los óxidos de silicio (SiO_2), aluminio (Al_2O_3), hierro (Fe_2O_3) y calcio (CaO), tienen excelentes características de adsorción, principalmente por su carga superficial y por la presencia de iones de hierro. El átomo central de silicio tiene una fuerte afinidad electrónica, lo que produce que tengan poca basicidad y como resultado, esto hace que su superficie actúe como un ácido débil, formando grupos funcionales de silanol ($SiOH^{-3}$), cuando los átomos de oxígeno superficiales reaccionan con el agua (Mohan y Gandhimathi 2009).

La arena sílica es un compuesto resultante de la combinación del Silicio con el Oxígeno. Su composición química está formada por un átomo de sílice y dos átomos de Oxígeno, formando una molécula muy estable: SiO_2 . se produce por trituración de piedra o arena de sílica de textura abierta, cribada a distribución de grano necesaria. La arena de sílice es producida por trituración de molienda y lavado de la sílice de alta calidad. Esta arena se utiliza como un medio granular filtrante en el tratamiento del agua potable y residual. Características físicas: arena de gránulo duro. El tamaño de grano de las partículas es variable, cribable, y principalmente de color marrón a gris. Se produce en números de malla 10 x 20 y 20 x 30. La producción nacional de sílice en 2013 fue de 2.9 millones de toneladas, 18.2 % menor con relación al 2012. Los principales estados productores son Coahuila (35.65 %), Veracruz (55.35 %) y Nuevo León (6.55 %). (Dirección general de Desarrollo Minero, 2011).

Una de las características primordiales para minimizar las limitaciones del flujo del agua subterránea, es el tamaño de las partículas, ya que un amplio rango de tamaños y muy pequeñas dimensiones podría resultar en un bloqueo entre los espacios intergranulares (Faisal, 2018).

Sin embargo, hasta el momento no se habían realizado experimentaciones con óxido de silicio (SiO_2) en forma de arena sílica, por lo que el objetivo fundamental de este trabajo es el de determinar que los componentes del material proveniente de la costa del Municipio de Alvarado, y cuentan con las características suficientes para ser empleados como barrera reactiva permeable para la remediación de la contaminación de los acuíferos subterráneos provenientes de lixiviados de basureros no controlados.

2. Metodología

a) El Municipio de Alvarado, Veracruz, México

El municipio de Alvarado se localiza en la llanura costera del Golfo, en la parte central del Estado de Veracruz (figura 1); tiene una extensión territorial de 840 km² y limita al norte con Boca del Río, al sur con Ignacio de la Llave, Acula, Tlacotalpan y Lerdo de Tejada; al Este con el Golfo de México y al Oeste con Medellín de Bravo y Tlalixcoyan, en la denominada Región del Papaloapan (Sefiplan, 2012), con predominio de ecosistema costero, con dunas, manglares y pastizales (Vázquez-lule et al. 2009).

Figura 1 Localización del Municipio de Alvarado, Veracruz, México



Fuente: Elaboración Propia

b) Los bancos de arena sílica de la costa del Municipio de Alvarado, Veracruz

La zona de donde se extrae la arena sílica está localizada en la costa sur del municipio de Alvarado, Veracruz, a 5.2 km de la desembocadura del río Papaloapan por la margen derecha (figura 2). Esta es una región de depósitos sedimentarios, producto de la interacción de los aportes fluviales, las aguas del Golfo de México y de los vientos y oleajes predominantes, con formaciones de la era cuaternaria, especialmente del pleistoceno (Díaz et al., 2018).

Los bancos de arena sílica se localizan en las coordenadas UTM GSW grado 15 (tabla 1).

Tabla 1. Coordenadas de banco de arena sílica de Alvarado, Veracruz, México

Vértice	X	Y
1	214 137.18	2 076 871.73
2	214 105.21	2 076 734.61
3	215 186.75	2 076 214.84

Para llegar a los bancos de arena sílica, desde la Ciudad de Alvarado, Veracruz, se toma la carretera Federal 180 en dirección a Lerdo de Tejada, por una distancia de 5.86 km, luego de lo cual se toma un camino de terracería rumbo a la costa por 1.66 km.

Figura 2. Localización de los bancos de arena sílica (18°45'35.86" N, 95°42'19.17" O)

Fuente: Google Earth (2019) Modificada por Estévez

c) Colecta y tratamiento de la arena sílica

La arena sílica fue recolectada en el mes de julio del año 2020, del banco costero, por medio de maquinaria, propiedad de la empresa Sílices de México y llevada a sus instalaciones ubicadas en Km. 55 + 500 carretera Federal 180, tramo Alvarado-Lerdo, en la congregación de Chocotán, en el Municipio de Alvarado, Veracruz. En este lugar se procesan 25 toneladas diarias mediante el secado con un horno rotatorio, con quemador y atomizador (figura 3), que usa como combustible diésel, para que mediante la introducción de la arena por medio de una tolva, esta avance en contra flujo con la corriente de calor, que se genera por el quemador, y sea retirada la humedad presente.

Figura 3. Horno de secado de sílices de México



Fuente: Propia

La empresa sílices de México embala la arena sílica en sacos de 25 kg, de los cuales se obtuvieron tres sacos de arena, procesada con un total de 75 kg para este análisis, los mismos que fueron trasladados por el propietario de la empresa a las instalaciones del Instituto Tecnológico de Veracruz, en donde se los identificaron como lotes 1, 2 y 3.

d) Análisis granulométrico de la arena sílica

El análisis granulométrico de la arena sílica se realizó utilizando mallas de números 14, 25, 35, 45 y 60 en la escala de Tyler, mediante un tamizador de laboratorio de fisicoquímica, tomando muestras por triplicado de 1000 gramos de cada uno de los sacos proporcionados por la empresa.

e) Contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó por triplicado para cada lote, con la utilización de una termobalanza, que es un analizador de humedad Adam modelo PMB, tomando muestras de 20 gramos, de cada uno de los tres lotes diferentes.

f) Determinación de silicio y fierro en la arena sílica

Para la determinación de silicio y fierro en la arena sílica, esta se trituró hasta malla 100 con un tamaño de partícula de $149 \mu\text{m}$; se colocaron 0.002 g de la muestra y se trataron con 10 ml de HNO_3 al 10 % y se diluyeron en un litro de agua destilada. Posteriormente se tomaron lecturas con un fotómetro Hanna HI83300, que utiliza un modo de medición de absorbancia que permite la utilización de los estándares CAL Check, para validar el rendimiento del sistema; este equipo permite seleccionar una de las cuatro longitudes de onda de la luz (420 nm, 525 nm, 575 nm y 610 nm), que mide y traza su propia curva de concentración contra absorbancia. Todas las muestras se leyeron por triplicado.

El método para la determinación de sílice se basa en la adaptación del estándar ASTM D859 – 16 por azul de heteropoliácido, de molibdeno, y el de fierro por modificación del método TPTZ (2,4,6-tripiridil-1,3,5-triazina).

g) Análisis estadístico

Para el análisis los datos obtenidos se aplicaron pruebas de análisis de medias de Tukey y Fisher con un nivel de confianza del 95 %, con el programa Minitab, a fin de encontrar el error estándar de la media tabular y las diferencias mínimas estadísticas, de los datos obtenidos en los resultados del laboratorio.

3. Resultados

Las principales propiedades físicas que se debe de tomar en cuenta para que un material pueda ser utilizado como barrera reactiva permeable es la granulometría de las partículas, la densidad y el contenido de humedad, ya que son esenciales para determinar la cantidad de relleno en la barrera reactiva permeable (Yin et al., 2017).

TAMAÑO DE PARTÍCULAS

El tamaño de las partículas es uno de los mecanismos clave para las BRP, ya que es un factor primordial para la adsorción de contaminantes en medios minerales (ITRC, 2011; Cucarella y Renman, 2009); además, los diámetros homogéneos permiten que la conductividad hidráulica (permeabilidad), de los medios reactivos, sea mayor que la del suelo circundante, permitiendo que el flujo de agua subterránea penetre fácilmente a través de la barrera reactiva permeable (Asokbunyarat y Annachhatre 2017).

El análisis granulométrico de la arena sílica se realizó utilizando mallas de números 14,25, 35, 45 y 60 en la escala de Tyler, mediante un tamizador de laboratorio en el Laboratorio de Físicoquímica del Instituto Tecnológico de Veracruz, en mayo del 2019. Se realizaron tomando 1000 gramos de muestra de cada uno de los tres lotes diferentes, proporcionados por la empresa sílice de México, en saquillos de 50 kg. Se operó el equipo por un periodo de cinco minutos y el procedimiento se repitió dos veces más, para obtener el resultado por triplicado (tabla 2).

Tabla 2. Análisis granulométrico de la arena sílica de Alvarado, Veracruz, México

Malla	Lote 1 Peso en g			Lote 2 Peso en g			Lote 3 Peso en g		
14	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
25	997.2	996.8	997.3	995.3	996.0	995.8	997.6	997.2	997.3
35	1.4	1.6	1.4	1.4	1.5	1.7	1.5	1.4	1.4
45	0.2	0.3	0.2	0.4	0.6	0.5	0.3	0.3	0.3
60	0.2	0.2	0.2	0.3	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2
Cernido	1.0	0.9	0.9	2.6	1.3	1.6	0.2	0.8	0.8

De acuerdo con los datos obtenidos, el promedio del peso de las muestras de malla 25, el 99.67 % de las partículas obtenidas, tienen un tamaño de 0.707 mm, y los resultados del programa minitab, en cuanto al análisis de las medias, refiere que el tamaño no presenta estadísticamente variación para ninguno de los tres lotes.

En cuanto a la malla 25, en ambos estadísticos el lote 1 y 3 no tienen diferencia estadística; sin embargo, el lote 2 sí presenta.

Figura 4. prueba de Fisher para malla 25

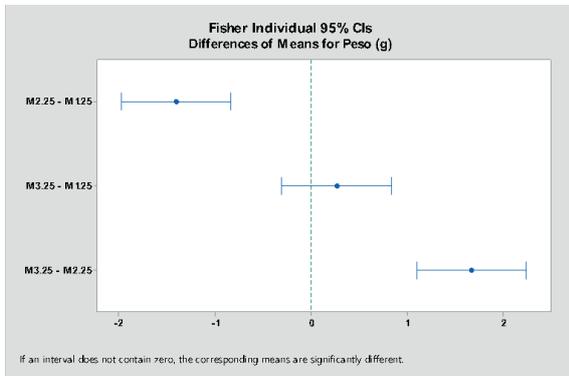
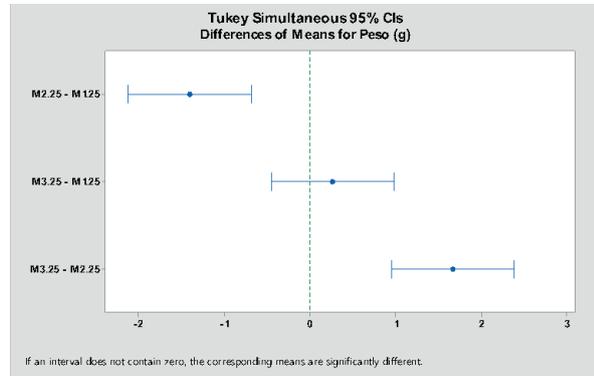


Figura 5. Prueba de Tukey para malla 25



CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad en el material para las BRP es esencial para la conductividad hidráulica (Yin et al., 2017), ya que junto con el gradiente hidráulico determinan la velocidad y dirección del flujo de los contaminantes en el agua subterránea (ITRC, 2011).

Para el caso de la humedad, se colocaron tres muestras de entre 25 y 26 gramos de cada uno de los lotes diferentes y se procedió a determinar el porcentaje en masa de humedad; los resultados que se obtuvieron se reportan en la tabla 3.

Tabla 3. Humedad relativa de la arena sílica de Alvarado, Ver

Lote 1 % Masa			Lote 2 % Masa			Lote 3 % Masa		
0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06

La media aritmética del porcentaje de masa de las nueve muestras es de 0.052 %, y de acuerdo con las pruebas estadísticas de Tukey y Fisher, ninguno de los lotes tiene diferencia estadística significativas.

Figura 6. prueba de Fisher para humedad

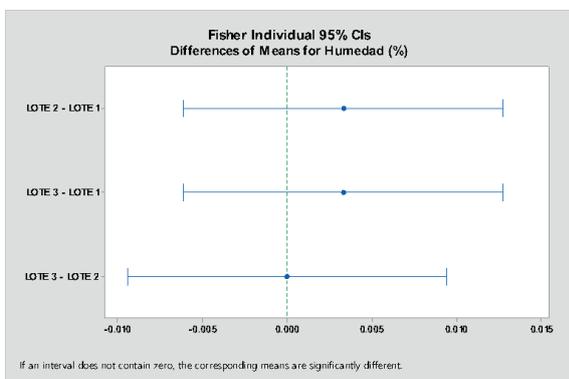
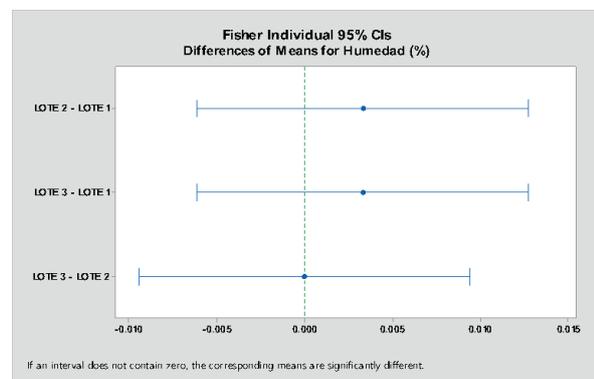


Figura 7. Prueba de Tukey para humedad



CONTENIDO DE SÍLICE Y FIERRO

Las muestras colectadas fueron tratadas con HNO_3 al 10 % y con abundante agua desionizada; posterior a lo cual se filtraron por medio de carbón activado, para eliminar los colores de interferencia. Las lecturas de los metales Si (SiO_2), y Fe (Fe_2O_3) se realizaron con un fotómetro Hanna HI83300, que utiliza un modo de medición de absorbancia, que permite la utilización de estándares, basados en la adaptación del método ASTM D859 – 16 por azul de heteropoliácido de molibdeno, y el de hierro por modificación del método TPTZ (2,4,6-tripiridil-1,3,5-triazina), a longitudes de onda de 610 nm para el silicio y de 420 nm para el hierro. Todas las muestras se leyeron por triplicado (tabla 4).

Tabla 4. Concentración de sílice y hierro en la arena sílica de Alvarado, Ver., México

Lote 1 mg/l		Lote 2 mg/l		Lote 3 mg/l	
SiO_2	Fe_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
1.74	0.05	1.80	0.05	1.74	0.06
1.75	0.05	1.73	0.06	1.75	0.05
1.73	0.05	1.74	0.06	1.75	0.06

Considerando que se pesaron 0.002 g de muestras en balanza analítica, se puede determinar que el porcentaje de sílice y de hierro en la arena sílica, es el siguiente (tabla 5).

Tabla 5. Concentración de sílice y hierro (en porcentaje) en la arena sílica de Alvarado, Ver.

Lote 1		Lote 2		Lote 3	
SiO_2	Fe_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
87.0	2.5	90.0	2.5	87.0	3.0
87.5	2.5	86.5	3.0	87.5	2.5
86.5	2.5	87.0	3.0	87.5	3.0

Como se puede observar en la tabla 5, el valor medio de la concentración de SiO_2 y Fe_2O_3 en la arena sílica de la costa del municipio de Alvarado, Veracruz, es de 87.38 % y 2.72 % respectivamente. Los resultados del programa Minitab, en cuanto al análisis de las medias, refiere que la concentración no presenta estadísticamente variación para ninguno de los tres lotes, ya que las pruebas de Tukey y Fisher para el SiO_2 y el Fe_2O_3 presentan distribuciones estadísticas homogéneas para ambos componentes.

Figura 8. prueba de Fisher para SiO_2

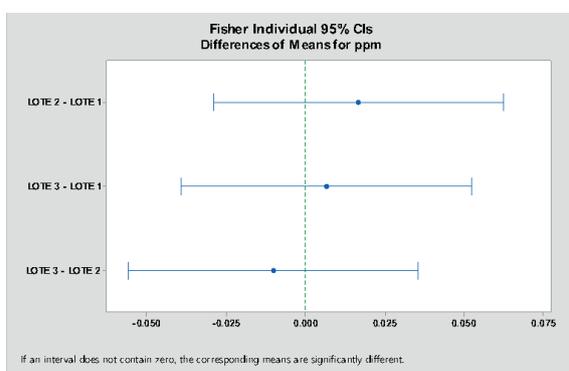


Figura 9. Prueba de Tukey SiO_2

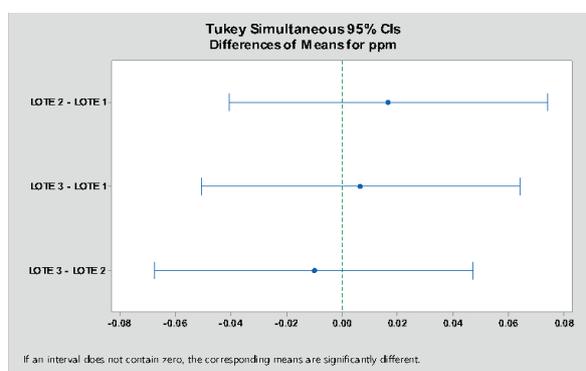


Figura 10. prueba de Fisher para Fe_2O_3

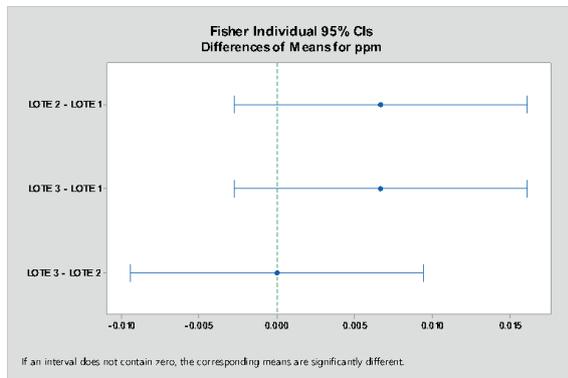
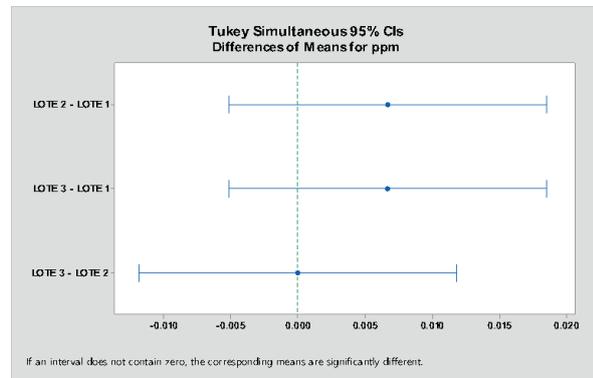


Figura 11. Prueba de Tukey Fe_2O_3



4. Discusión

Los medios reactivos utilizados en barreras permeables deben ser compatibles con el entorno subsuperficial (Faisal et al. 2018). En el caso de la arena sílica del Municipio de Alvarado, Veracruz, este material, que se obtiene de manera natural y que proviene de los sedimentos que arrastra el río Papalopan hacia el mar, donde por las corrientes marinas se deposita en la zona de estudio (Díaz et al., 2018), se ha usado como biofiltros, ya que se ha comprobado que tienen la capacidad de eliminar la turbidez, color, sólidos suspendidos, compuestos orgánicos e inorgánicos y bacterias (Payan, 2013).

El análisis granulométrico resultante (tabla 2) de la arena sílica de las costas de Alvarado, Veracruz, México, determinó que el 99.67 % de las partículas tiene un tamaño de 0.707 mm. Esta homogeneidad en el tamaño de las partículas permitirá asegurar un flujo uniforme en las BRP (Arenas, 2017), y una conductividad hidráulica adecuada para la retención de iones metálicos divalentes (Courcelles et al., 2011), mediante el mecanismo de adsorción por el medio mineral (ITRC, 2011), lo que permitirá minimizar las limitaciones de flujo del agua de los acuíferos subterráneos, ya que por su tamaño homogéneo no se presentaría el bloqueo entre los espacios intergranulares (Faisal, 2018).

Los porcentajes de retención para Pb y Zn en columnas con material reactivo con tamaños de partículas de 2 a 3 mm, son muy elevados, cercanos al 99 % y del 90 al 95 % para Cd y As, disminuyendo ligeramente cuando aumenta la granulometría del adsorbente (Pérez, 2014). Bajo condiciones de homogeneidad granulométrica, las arenas sílicas de Fairmount Minerals and Subsidiaries—Best Sand, Ohio en los Estados Unidos, con tamaños de 0.2 a 0.5 mm, ha presentado eficiencias la remoción de PO_4^{3-} en rangos de 21 al 58% (Agrawal et al., 2011).

La arena sílica de las costas del municipio de Alvarado, Veracruz, tiene una concentración media de SiO_2 y Fe_2O_3 (tabla 5) de 87.38 % y 2.72 % respectivamente; estos valores son muy similares a la arena residual de fundición, que se ha utilizado como barrera reactiva permeable en aguas subterráneas (94.36 % de SiO_2 y 2.12% de Fe_2O_3), las cuales han reportado eficiencias para la remoción de cobre hasta 93 % (Faisal y Ahmed, 2014).

El contenido de SiO_2 se encuentra en los promedios obtenibles en bancos de materiales para diversos fines (Narasimha, 2016; Díaz, 2018), ya que el rango de valores oscila entre el 85 y el 90 %; sin embargo, el contenido de Fe_2O_3 en comparación con otras zonas (Díaz, 2018), es superior a los materiales que se han utilizado para la inmovilización de metales pesados como

cobre, níquel, cromo, plomo, mercurio, cadmio (Ademe, 2014). Si bien los silicatos pueden influir negativamente en las barreras reactivas permeables, diseñadas para la eliminación de metales traza (ITRC, 2011), el alto contenido de Fe^{3+} permite que se realicen los mecanismos de degradación química de metales pesados como el Cr^{6+} a Cr^{3+} (Chimenos y Navarro, 2002).

5. Conclusiones y recomendaciones

El material reactivo es el principal componente utilizado en el sistema de barreras reactivas permeables (BRP), para facilitar la eliminación de contaminantes de las aguas subterráneas. Los principales criterios para la selección del material son la disponibilidad del material, la reactividad, la estabilidad mecánica, la rentabilidad, la conductividad hidráulica, la compatibilidad ambiental y la seguridad para su uso (Roehl et al., 2005; ITRC 2011; Yin et al., 2017).

Considerando los criterios de selección del material para las barreras reactivas permeables, la arena sílica proveniente de las costas del municipio de Alvarado, Veracruz posee alta estabilidad, ya que por su alto contenido de Fe_2O_3 permanecerá activa durante un período de tiempo más largo. La cantidad y disponibilidad permiten que sea transportada con costos accesibles para la mayor parte del país, y dado que su diámetro es homogéneo a 0.707 mm, permitirá que su permeabilidad sea mayor a la de los suelos convencionales, además de ser un material compatible con el ambiente y seguro para su trabajo.

Los medios reactivos utilizados en barreras permeables deben ser compatibles con el entorno subsuperficial. Es decir, los medios no deben causar reacciones químicas adversas o productos, al reaccionar con los componentes en la columna de contaminantes, y no deben actuar como una posible fuente de contaminantes. El material debe permitir el flujo de agua subterránea, lo cual se consigue con un tamaño de partículas que no sea excesivamente pequeño y con una granulometría heterogénea, para que no resulten bloqueados los espacios intergranulares (Maitra, 2019; Mital et al. 2020).

El silicio, como el de la arena sílica del municipio de Alvarado, Veracruz, cuenta con una estructura a través de la cual los cationes intercambiables son adsorbidos, ya que actúa como medio poroso y cuando es permeado por agua, los metales que pasan a través de este material se atrapan vía intercambio iónico, permitiendo que este sistema de retención (Mohan y Gandhimathi, 2009) tenga una disponibilidad muy alta, pues estos bancos son utilizados para material de Sand-Blast y se distribuye a todo el país.

Mediante el uso de la arena sílica de la costa del municipio de Alvarado, Veracruz, como barrera reactiva permeable, se puede lograr una atenuación más rápida de los contaminantes del agua subterránea en condiciones controladas. La barrera también evita que los contaminantes provenientes de los lixiviados de los basureros no controlados en el agua subterránea migren a acuíferos no contaminados (Chimenos y Navarro, 2002; Cordeiro y Viera, 2020).

La arena sílica posee alta estabilidad por su alto contenido de Fe_2O_3 , y es un material que se tiene en cantidad y disponibilidad para la exigencia de remediación de acuíferos contaminados con lixiviados de basureros no controlados, ya que puede ser transportado con costos accesibles para la mayor parte del país por las compañías ubicadas en la zona de Alvarado, Veracruz y, dado que su diámetro es homogéneo, permitirá una mayor permeabilidad sin que se degrade el material, el cual es compatible con el ambiente porque solo es extraído, tamizado y secado. De igual manera, como se muestra en las comparaciones realizadas en el presente artículo, sus características físico-químicas son estadísticamente similares, lo cual garantiza resultados de calidad en sus aplicaciones.

Las barreras reactivas permeables carecen de partes móviles, equipamiento y ruido. Los materiales reactivos se colocan por medio de zanjas, lo que no perjudica a las aguas subterráneas ni a las personas y como el proceso de limpieza es bajo tierra, no se tiene contacto con los contaminantes. (Arenas, 2017; Mital et al., 2020).

Se recomienda, como siguiente paso, determinar la eficiencia de remoción de metales pesados y de carga orgánica, para poder realizar la ingeniería necesaria para la remoción de contaminantes de los acuíferos subterráneos.

Referencias

- ADEME. (2014). *Barrières réactives*. Cahier SKB, 7761. <https://bit.ly/3lR1dJO>
- Arenas, G. (2017). *Barreras reactivas aplicables en acuíferos para la remoción de materia orgánica proveniente de residuos urbanos* (tesis de maestría). Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Ambiental – Agua). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Agrawal, S.; King, K.; Fischer, R.; Woner, D. (2011). P043– Removal by and Permeability of Industrial Byproducts and Minerals: Granulated Blast Furnace Slag, Cement Kiln Dust, Coconut Shell Activated Carbon, Silica Sand, and Zeolite. *Water Air Soil Pollut* 219, 91-101.
- Arenas-Moreno, G. (2017). *Barreras reactivas aplicables en acuíferos para la remoción de materia orgánica proveniente de residuos urbanos*. [Tesis de Maestría, Ingeniería Ambiental-Agua, UNAM, México]
- Asokbunyarat,V.; Lens, P.; Annachhatre, A. (2017). *Permeable Reactive Barriers for Heavy Metal Removal, Sustainable Heavy Metal Remediation*. Vol. 1. Principles and Processes (pp. 65-100).
- Bohn, H. L.; McNeal, B. L.; O'Connor, G. A. (1985). *Soil Chemistry*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Bernaché, G. (2012). Riesgo de contaminación por disposición final de residuos. Un estudio de la región centro occidente de México. *Rev. Int. Contam. Ambie* 28, Sup. (1), 97-105.
- Chimenos, J.; Navarro, A. (2002). Descontaminación de aguas subterráneas mediante barreras reactivas permeables. *Tecnología del Agua* 1, 38-45.
- Cordeiro Andrade, D.; Vieira dos Santos, E. (2020). Combination of Electrokinetic Remediation with Permeable Reactive Barriers to Remove Organic Compounds from Soils. *Current Opinion in Electrochemistry* 22, 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.06.002>
- Courcelles, B.; Modaressi-Farahmand-Razavi, A.; Gouvenot, D.; Esnault-Filet, A. (2011). *Influence of Precipitates on Hydraulic Performance of Permeable Reactive Barrier Filter*. Vol. 1. International Journal of Geomechanics, No. 2, April.
- Cucarella, V.; Renman, G. (2009). *Phosphorus Sorption Capacity of Filter Materials Used for On-site Wastewater Treatment Determined in Batch Experiments—A Comparative Study*. *J. Environ. Qual*, (38), 381–392.
- Díaz, M.; Campos, R.; Zamora, S.; Salgado, R. (2018). *Cuantificación experimental del contenido masivo de SiO₂ en depósitos eólicos de arena en una región de la cuenca del río Papaloapan, Veracruz, México*. Vol. 22. Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, 22, No. 1.
- Dirección General de Desarrollo Minero. (2011). *Perfil del mercado del sílice*, Secretaría de Economía, Gobierno de México.
- Faisal A., Ahmed M. (2014). *Removal of Copper Ions from Contaminated Groundwater Using Waste Foundry Sand as Permeable Reactive Barrier*. *Int. J. Environ. Sci. Technol*, (12), 2613–2622.
- Faisal, A.; Sulaymon, A.; Khaliefa, Q. (2018). A review of Permeable Reactive Barrier as Passive Sustainable Technology for Groundwater Remediation. *Int. J. Environ. Sci. Technol*, (15), 1123–1138.
- Han, Z.; Ma, H.; Shi, G, et al. (2016). *A review of Groundwater Contamination Near Municipal Solid Waste Landfill Sites in China*. *Sci. Total Environ*, 569–570; 1255–1264.

- ITRC. (2011). *Permeable Reactive Barrier: Technology Update*. BRP-5. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, BRP: Technology Update Team. <https://bit.ly/3jN2z5L>
- Liu, S.; Li, X.; Wang, H. (2011). *Hydraulics Analysis for Groundwater Flow Through Permeable Reactive Barriers*, *Environ Model Assess* (2011), 16:591–598.
- Maitra S. (2019). Permeable Reactive Barrier: A Technology for Groundwater Remediation – A Mini Review. *Research Journal of Life* 5(1):203.
- Miao, L.; Yang, G.; Tao, T.; Peng, Y. (2019). *Recent Advances in Nitrogen Removal from Landfill Leachate Using Biological Treatments - A Review*. *J. Environ. Manag.*, (235),178-185.
- Mittal, A.; Singh, R.; Chakma, S.; Gaurav, G. (2020). *Permeable Reactive Barrier Technology for the Remediation of Groundwater Contaminated with Nitrate and Phosphate Resulted from Pit-Toilet Leachate*. Vol. 37. *Journal of Water Process Engineering*.
- Mohan, S.; Gandhimathi, R. (2009). Removal of Heavy Metal Ions from Municipal Solid Waste Leachate Using Coal Fly Ash as an Adsorbent. *J Hazard Mater* 169(1–3):351–359.
- McRae, C. (1999). Evaluation of Reactive Materials for In Situ Treatment of Arsenic III, Arsenic V and Selenium VI Using Permeable Reactive Barriers: Laboratory Study, (MSc Thesis). University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
- Narasimha, I; Bubu, J. (2016). Investigations on Physical and Chemical Properties of High Silica Sand, Fe-Cr Slag and Blast Furnace Slag for Foundry Applications. *Procedia Environmental Sciences* (35), 583 – 596.
- NOM-083-Semarnat-083. (20 de octubre de 2004). Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. *Diario Oficial de la Federación*. México.
- Naveen, B. P.; Mahapatra, D. M.; Sitharam, T. G.; Sivapullaiah, P. V., Ramachandra, T. V. (2017). Physico-chemical and Biological Characterization of Urban Municipal Landfill 373 Leachate. *Environ. Pollut* 220, pp. 1-12.
- Payan, S. (2013). *Estudio y diseño de biofiltro a partir de materia orgánica para el tratamiento de agua* [Tesis de Doctorado, Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.]. <https://bit.ly/35c00tj>
- Pérez Espinoza, V. (2014). *Inmovilización de elementos potencialmente tóxicos en zonas mineras abandonadas mediante la construcción de techosoles y barreras reactivas permeables* [Tesis de Doctorado, Universidad de Murcia, España] <https://bit.ly/3h5qHPb>
- Roehl, K. E.; Czurda, K.; Meggyes, T.; Simon, F. G.; Stewart, D. I. (2005). Permeable Reactive Barriers. In: Roehl KE, Meggyes T, Simon FG, Stewart DI (eds.) *Long-term Performance of Permeable Reactive Barriers*. Elsevier, Amsterdam Sciences, Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Sciences 5(1) 203-217.
- Scherer, M. M.; Richter, S.; Valentine, R. L.; Álvarez P. J. J. (2000). Chemistry and microbiology of permeable reactive barriers for in situ groundwater clean-up. *Critical Reviews. Environmental Science and Technology* 30(3): 363-411.
- SEFIPLAN. (2012). *Estudios regionales para la planeación. Información básica*. Gobierno de Veracruz. <https://bit.ly/3jM057D>
- Segura, R.; Martínez, G.; Apolinar, J.; García, M. (2015). Remoción de Cr6+ de lixiviados de tiraderos de basura con arcillas modificadas o activadas. *Ciencia UANL* 75, año 18, pp. 54-70.
- Striegel, J.; Sanders, D. A.; Veenstra, J. (2001). Treatment of Contaminated Groundwater Using Permeable Reactive Barriers. *Environmental Geosciences* 8(4), 258-265.
- Susunaga-Miranda, M. A.; Estévez-Garrido, B. M. (2018). Metales pesados en los lixiviados provenientes del basurero no controlado de la Ciudad de Veracruz. Vol. 5 *Revista Iberoamericana de Ciencias* 6, 164-171.
- Thiruvengkatachari, R.; Vigneswaran, S.; Naidu, R. (2008). Permeable Reactive Barrier for Groundwater Remediation. *J Ind Eng Chem* 14(2):145–156.

- Teta, C. & Hikwa, T. (2017). Heavy Metal Contamination of Ground Water from an Unlined Landfill in Bulawayo, Zimbabwe. *Journal of health & pollution* 7(15), 18–27.
- Vázquez-Lule, A.; Rodríguez-Zúñiga, M.; Ramírez-García, P. (2009). Caracterización del sitio de manglar sistema lagunar de Alvarado Veracruz, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). *Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica*. Conabio, México, D.F
- Vukojević, N.; Daković, A.; Ugrina, M. et al. (2017). Evaluation of Low-cost Sorbent as Potential Materials for In-Situ Remediation of Water Contaminated with Heavy Metals. *Technologica Acta* 10(2) 9–13.
- Yin, S.; Herath, G.; Heng, S.; Kalpage, S. (2017). Using Permeable Reactive Barriers to Remediate Heavy Metal-Contaminated Groundwater through a Laboratory Column. *Experiment American Journal of Environmental Sciences* 13(2): 103-115

Efficient Prediction and Analysis of the possible evolution of the SARS-CoV-2 in COVID-19 applying the SEIR model in Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador

(Predicción y análisis eficiente de la posible evolución del SARS-CoV-2 en COVID-19, aplicando el modelo SEIR en Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador)

Moisés Filiberto Mora Murillo¹, Walter Alfredo Mora Murillo², Digvijay Pandey³

Abstract

In Ecuador, in the Santo Domingo de los Tsáchilas province, a Special Operations Committee (SOC) was created to take containment measures against severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-COV-2). This research deals with an analysis of the possible spread of the SARS-COV-2 virus causing the infectious disease caused by new coronavirus (2019-nCoV) using the Susceptible, Exposed, Infected and Recovered (SEIR) model as a prediction method according to the rigor of the containment measures evaluated. with the acceptability of people through a survey (95 %, CI) in which three parameters (α) severity of containment measures, (k) social impact of the pandemic and (β) transmission rate, are determined, which we then used as β (t) with initial value of $\beta = 1$. All this considering the rapid proliferation of the virus in the province and having an average of $\alpha = 3.23$ (95 % CI: 3 - 4) and for $k = 4.10$ (95 % CI: 4 - 5) that the authorities will use to mitigate the spread of the virus, as well as future outbreaks of the disease.

Keywords

SARS-CoV-2; Corona virus; Modeling; Simulation; transmissible, SEIR.

Resumen

En Ecuador, en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, se creó un Comité de Operaciones Especiales (SOC), para tomar medidas de contención contra el coronavirus 2, del síndrome respiratorio agudo severo (SARS-COV-2). Esta investigación aborda un análisis de la posible propagación del virus SARS-COV-2, que causa la enfermedad infecciosa, provocada por el nuevo coronavirus (2019-nCoV). Para ello se utiliza el modelo *Susceptible, Exposed, Infected and Recovered* (SEIR), como método de predicción, de acuerdo con el rigor de las medidas de contención evaluadas y con la aceptación de las personas, a través de una encuesta (95 %, IC), en la cual se determinan tres parámetros: (α) gravedad de las medidas de contención, (k) impacto social de la pandemia, y (β), tasa de transmisión, que luego usamos como β (t) con valor inicial de $\beta = 1$. Todo esto, al considerar la rápida proliferación del virus en la provincia y que tiene un promedio de $\alpha = 3.23$ (IC 95 %: 3 - 4), y para $k = 4.10$ (IC 95 %: 4 - 5), que las autoridades utilizarán para mitigar la propagación del virus, así como futuros brotes de la enfermedad.

Palabras clave

SARS-CoV-2; Corona virus; Modelación; Simulación; transmisibilidad.

1. Introduction

New corona -viruses appear to emerge periodically in humans, mainly due to the high prevalence and wide distribution of corona-viruses, the large genetic diversity and frequent recombination of

1 Instituto Superior Tecnológico Japón. Santo Domingo, Ecuador. [mmora@itsjapon.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-2764-1524>]

2 Instituto Superior Tecnológico Japón. Santo Domingo, Ecuador. [wmora@itsjapon.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-6854-6101>]

3 Kamla Nehru Institute of Technology. Sultampur, India. [digit11011989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2126-9650>]

their genomes, and the increase of human-animal interface activities (Zhu, 2019). "In late December 2019, a number of local health authorities reported clusters of patients with pneumonia of unknown cause, which were epidemiological linked to a seafood market in Wuhan, Hubei Province, China". (Zhu, 2019). In the province of Santo Domingo de los Tsáchilas the first positive case of SARS-COV-2 was registered in a person who resides in the city of Santo Domingo, but works in the city of Manta. "In Santo Domingo the number of positive cases increased exponentially" according (SNGR, 2020). The provincial, cantonal and parish Special Operations Committees (SOC) took measures such as completely suspending the mobilization of urban and inter-provincial buses, taxis and curfews for intervals of time to minimize the dynamics of people.

Santo Domingo de los Tsáchilas is a province with 368 013 inhabitants according to (INEC, 2010), at present (10 years later) it is estimated to have a population of 500 000 inhabitants according to a survey carried out by the same institution. It is one of the most transient provinces of the country, because it is one of the main passages from the coast to the mountains, it also hosts a diverse population as there are people who have come from all over Ecuador.

In view of the imminent arrival of the 2019-nCoV disease pandemic, the authorities of the province and the country have taken several strategies to stop the spread of the virus in the population. The preventive measures taken by (GadStoDgo, 2020) the Minister of Government and Minister of Education are:

- Restriction for passengers who during the 14 days have been in Hubei and Wuhan in China, Italy, the Kingdom of Spain, France, the Islamic Republic and Iran.
- Mass events are suspended and public events of more than 1000 people.
- The ban is also for night-time entertainment establishments because they are closed places.
- Lifetime Brigades are suspended, except for medical brigades throughout the country.
- 2019-nCoV testing will be authorized to qualified laboratories in other cities.
- Alert platform for possible cases of Corona-virus.
- There are 22 hospitals throughout the country to attend to cases, of which 1 is in Santo Domingo.
- Classes will be suspended throughout the country.
- Curfew is in place at intervals throughout the country.

The purpose is to model and try to extract the significantly important aspects of this real situation, to translate them into expressions and differential equations of models used for previous pandemics. First, the most common mathematical model (SIR) for this type of pandemic will be implemented, and later others with particular adaptations to the 2019-nCoV corona-virus epidemic, such as the one called (SEIR), to which changing parameters are incorporated in order to simulate the measures taken by the national government that influence the entire country, as in Santo Domingo de los Tsáchilas. Consider that we are not trying to make a real prediction with concrete numbers, in which we would need more technical data to try to approach reality with less margin of error, but rather to show the influence of the measures taken by the authorities on the development of the epidemic.

1.2. Theoretical background

A new human corona-virus, now termed 2019-nCoV, emerged during December 2019 in the Chinese city of Wuhan. As of 1900 GMT 24th January 2020, over 900 cases have been reported in

China (with 26 deaths), and cases have been detected in at least 9 regions or countries outside mainland China. Initial phylogeny analysis suggests that the new virus is similar to the SARS corona-virus when compared with other corona-viruses known to infect humans (Imai, 2020).

This led several groups of Chinese scientists to identify a new type of corona-virus. The high spread of the infection accelerated studies in Wuhan City and Hubei Province, China, considered the epicenter of the outbreak.

On January 30, 2020, the World Health Organization named the new virus SARS-CoV-2, called the type of pneumonia that produces the virus 2019-nCoV, and declared a global medical emergency.

Corona-viruses are a type of single-stranded RNA virus, which affect animals and humans, causing respiratory, liver, gastrointestinal and even neurological diseases. This type of CoVs is divided into four classes: alpha-corona virus, beta-corona virus, gamma-corona virus and delta-corona virus. Currently, 6 types of human corona viruses have been identified, including SARS-CoV and MERSCoV, responsible for respiratory disease pandemics reported in 2003 and 2012, respectively (Li R, 2020).

Several factors seem to influence whether corona viruses are related to humans, "including the prevalence, wide geographical distribution of these viruses and increased interactions between humans and animals, especially wildlife" according to (Castro, 2020).

SARS-CoV-2 has a zoonotic origin (not yet identified), it is a positive single-stranded RNA beta-coronated virus, as are SARS-CoV and MERS-CoV.

The number of people an infected person can infect is known as R_e (effective reproduction number). According to (Li R, 2020) "the effective reproduction number R_e is estimated to be 2.38 (95% CI: 2.04 - 2.77), which shows a high capacity of the virus to sustain transmission over time". Rulers should look for mechanisms to reduce it to numbers below 1, considering that the pandemic is under control.

1.3. SARS-CoV-2 infection

A person can get COVID-19 from contact with another person who is infected with the virus. The disease can spread from person to person through droplets from the nose or mouth that are released when an infected person coughs, sneezes, or breathes out. These droplets land on surfaces and objects around the person, causing other people to come into contact with the virus by touching these surfaces or objects, and can contract VID-19 if they touch their face, allowing the virus to enter the body through the nose, mouth, and eyes. There is also a risk of infection if droplets released by sick people are inhaled. This has led to the three main recommendations: keep at least one meter between people, wash your hands frequently and avoid touching your face with unwashed and/or disinfected hands (OMS, 2020).

1.4. Incubation time

The manifestation of the first symptoms is around 5 days, average incubation time according to several contributions. "A study on a sample of 180 confirmed patients establishes that the median incubation period was estimated at 5.1 days (95% CI, 4.5 to 5.8 days). Furthermore, it was concluded that 97.5 % of the patients developed symptoms in 11.5 days (IQ, 8.2 to 15.6 days) of infection" according to (Lauer, 2020). In this publication they conclude that after 14 days of active monitoring or quarantine 101 out of 10,000 cases (99th percentile, 482) will develop symptoms. (Wu, 2020) Similar estimates are given in.

In recent publications, the mean incubation period of CoVID- 19 was a little bit different, “with 138 cases, reported that the median durations from first symptoms to dyspnea, hospital admission, and acute severe respiratory syndrome (ARDS) were 5 days (range, 1–10), 7 days (range, 4–8), and 8 days (range, 6–12)” respectively (Wang, 2020).

Instead “with 425 confirmed cases, instructed that the mean incubation period was 5.2 days (95% confidence interval [CI], 4.1–7.0), with the 95th percentile of the distribution at 12.5 days. In its early stages, the epidemic doubled in size every 7.4 days. With a mean serial interval of 7.5 days (95% CI, 5.3–19), the basic reproductive number was estimated to be 2.2 (95% CI, 1.4–3.9)” (Lin, 2020). While (Guan, 2019), “with 1099 patients, reported that the estimated mean incubation period of SARS-CoV-2 infection was 3.0 days (range, 0–24.0), which was shorter than in the two research reports above (3.0 days vs 5 days and 5.2 days).

1.5. Symptoms

Symptom of CoVID-19 are non-specific and the disease presentation can range from no symptoms (asymptomatic) to severe pneumonia and death. A study of 41 patients (Huang, 2020) “who were initially diagnosed with the outbreak (the diagnosis date was up to 2 January) found that the most common symptoms were fever (98%), cough (76%), myalgia or fatigue (44%); and atypical symptoms included sputum (28%), headache (8%), hemoptysis (5%) and diarrhea (3%)”.

Also (Huang, 2020) “found that the most common symptoms were fever (87.9%), cough (67.7%), diarrhea (3.7%) and vomiting (5.0%). 25.2% of the patients had at least one underlying disease (such as hypertension, chronic obstructive pulmonary disease).”

2. Methodology

As a research methodology, the collection of information was through surveys with a 95% confidence sample in the province of Santo Domingo de los Tsáchilas, which according to (INEC, 2010) “estimates a population of 500 000 inhabitants”. The information was obtained through a survey; this was sent by telematic means due to the high risk of contagion of the virus. This causes a bias in the real data because not all the interviewees work full time, some are teachers who work from home, but all can qualify the measures adopted by the authorities.

To determine the parameters (rigidity of the containment measures) α , (social impact of the pandemic) k , several questions were asked to quantify on a scale of 1 - 5, descriptive statistics were applied to have the real values of the parameters in the which is evidence of extreme public concern in relation to the 2019-nCoV, and disagreement with the containment measures taken by the authorities. Section 3.1 provides an example of the SEIR model in which no actual data is used.

In section 3.2 for modeling and simulation in current scenarios, $\alpha = 3.22$ (95 % CI: 3 - 4) and for $k = 4.10$ (95 % CI: 4 - 5) was set, for MatLab modeling, a rule of three was made Simple in relation to the unit for α (various scenarios of containment measures) and for k a scale of 100 was considered as proposed (Lin, 2020). Finally, β (t) is considered with the variation of measures.

2.1. Methodological example about Epidemiological Model SEIR

The main hypotheses formulated to build these models are in other pandemics such as SARS (Li, Wang & Jin, 2006):

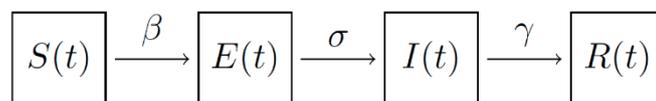
- The disease that is modeled confers immunity to the people who recover.
- The total population N is constant, $S(t) + E(t) + I(t) + R(t) = N \forall t$. This implies that births and deaths in the period are negligible and that the disease does not It is mortal;
- The population is uniformly distributed in the considered region;
- The rate of increase of E is proportional to the number of contacts between S and I (since the flow is unidirectional, all new exposed comes from the population susceptible); and
- The rates of decrease of S , E , and I are proportional to S , E , and I , respectively (since the more extensive the population, the more individuals are exposed, infected, or recovered in each case). Likewise, the increase in R is equal to the decrease in me.

This model, being an extension of the SIR model, demonstrates the importance of epidemiological fences, since a new variable (exposure to infection) is included and therefore a new $E(t)$ equation. Then we denote, if an individual does not present symptoms, but can infect others we count it in $I(t)$, not in $E(t)$.

The relationship of the new variable $E(t)$ with $I(t)$ leads to a new parameter θ , so that $1/\theta$ is the average incubation time. So, the new class of individuals who carry the $E(t)$ disease but who, being in their incubation period, do not show symptoms and cannot yet infect others, for example, people in the inner circle of people already infected or people who have had interaction with infected people in public transport systems, etc. It's true that: $S(t) + E(t) + I(t) + R(t) = N$

Therefore in figure 1 we have:

Figure 1. Sequence of the functions, in relation to the parameters for the SEIR model.



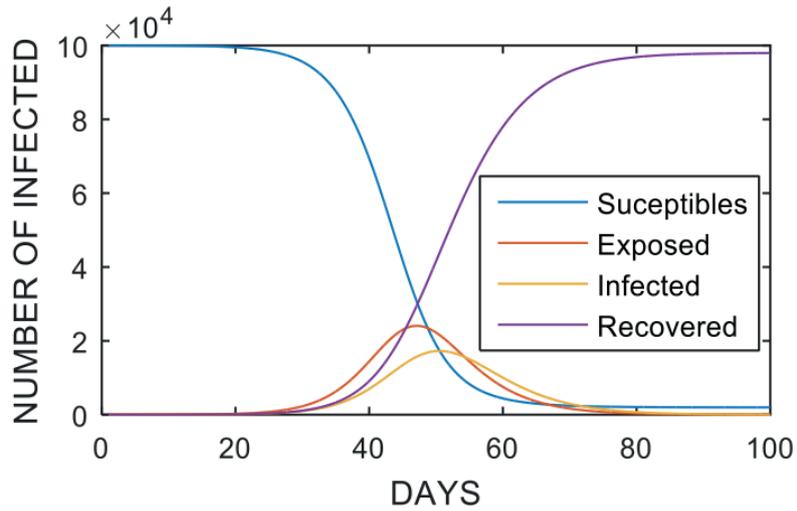
In figure 2 we have the system of differential equations for the SEIR model:

Figure 2. System of ordinary differential equations of the SEIR model

$$\begin{cases} S'(t) = -\beta S(t)I(t)/N, \\ E'(t) = \beta S(t)I(t)/N - \sigma E(t), \\ I'(t) = \sigma E(t) - \gamma I(t), \\ R'(t) = \gamma I(t), \end{cases}$$

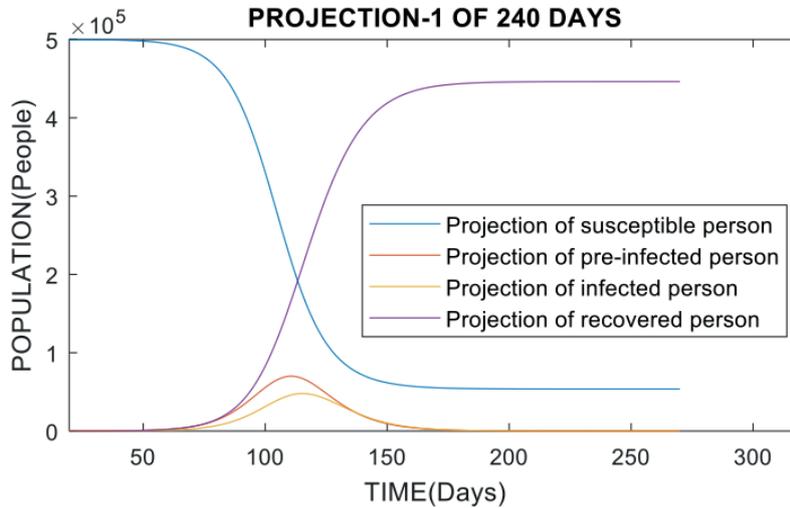
An example using the SEIR method is presented in Figure 3, with population $N = 100\,000$ people, parameters $\beta = 1$, $\gamma = 1/4$, $\theta = 1/5$ and initial values for the functions $E(0)=5$; $I(0)=1$; $R(0)=0$.

Figure 3. As in the SIR model, the infection rate is high with respect to exposure and recovery rates, generating accelerated growth of the exposed population and, subsequently, of the infected population



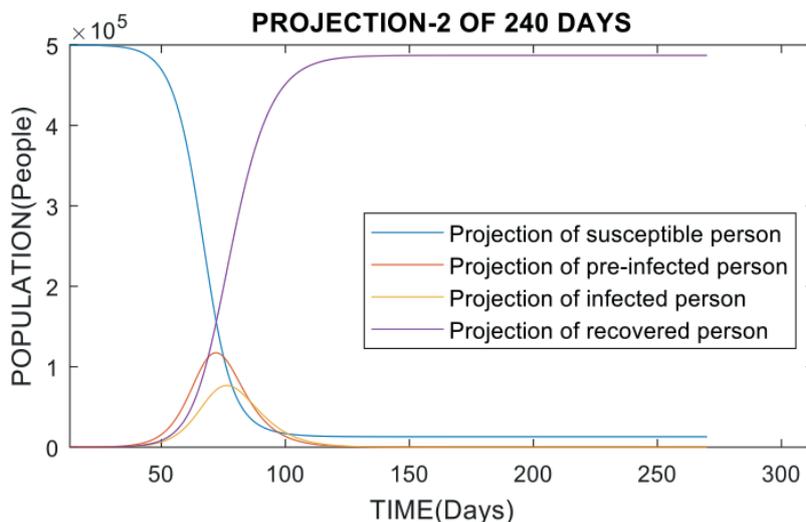
An example using the SEIR method is presented in Figure 4, with population $N = 500\,000$ people, parameters $\beta = 0.5$, $\gamma = 1/5$, $\theta = 1/7$ and initial values for functions $E(0)=10$; $I(0)=1$; $R(0)=0$.

Figure 4. Graph of population with 500 000 inhabitants, reproduction rate of R_0 virus = 2.5. We would have similar results to China, with high recovery rate and, the estimation of the peak of the curve in infected in 120 days



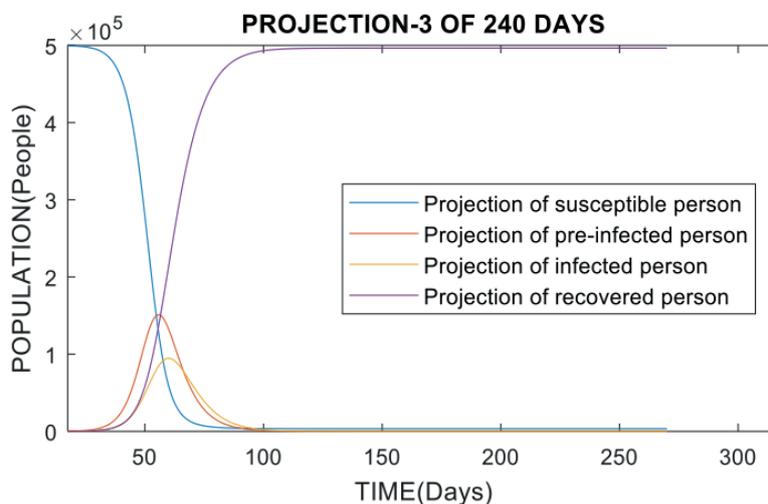
An example using the SEIR method is presented in Figure 5, $N = 500\,000$, parameters $\beta = 0.75$, $\gamma = 1/5$, $\theta = 1/7$ and $E(0)=10$; $I(0)=1$; $R(0)=0$.

Figure 5. Graph of population with 500 000 inhabitants, reproduction rate of Ro virus = 3.75. We would have an exponential growth of infected people reaching a peak in 70 days, and a low rate of recovery



An example using the SEIR method is presented in Figure 6, $N = 500\,000$, parameters $\beta = 1$, $\gamma = 1/5$, $\theta = 1/7$ and $E(0)=10$; $I(0)=1$; $R(0)=0$.

Figure 6. Graph of population with 500 000 inhabitants, reproduction rate of Ro virus = 5. it would have an exponential growth of infected people reaching a peak in 55 days, and it would be extremely difficult to control the epidemic



2.2. Epidemiological model for COVID-19 with government containment measures

In Ecuador, several measures have been taken since the first positive case of the epidemic, considering that the public health system may collapse as in all affected countries. The population has not taken sufficient precautions to try to stop the spread of the virus, even though the

government provides for social isolation measures such as quarantine and curfews for intervals of time there is mobility and social dynamics. Ecuador, according to (INEC, 2020) “has an unemployment rate of 3.8 %”, which is why people continue to take to the streets and this becomes a determining factor in the growth of the number of infected people who are symptomatic or asymptomatic.

In order to describe the spread of the disease and the behavior of the virus, several studies have taken into account other types of individuals, such as those who always remain asymptomatic (which may affect others) or those who never become infected (this seems to be the case with children), among other parameters related to quarantine, government measures and the periods of diagnosis.

The virus mutates according to population dynamics, which causes different measures to be taken in different countries. At the end of 2019 in Wuhan, studies focused on local variables, such as infection directly from contact with animals, as well as the extraordinary population movements resulting from the Chinese festivities of the time.

As we have been saying, what is unnecessary when studying the dynamics of an epidemic is to propose a model (in this case SEIR) and to know the value of the parameters involved: β , γ and θ .

According to (Lin, 2020), “ $1/\gamma = 5$ days and $1/\theta = 7$ days (these numbers are approximate averages, and may vary quite a bit from person to person)”. A real challenge is to estimate β ; because you don’t have the real local value of how many asymptomatic infected people may be infecting others.

Before they adopted drastic isolation measures in China and after several studies on the dynamics of the disease, (Wu, 2020) suggest that “the value of β could be between 0.59 and 1.68 (in units’ days-1), which would give a RO between 2.95 and 8.4, in both cases quite high and take $RO = 2.68$ ”.

To exemplify Figure 3 and 6, the infection rate $\beta=1$ has been considered constant. However, this parameter can be artificially modified by applying protection and social isolation measures, which would be adjusted by whether or not the population complies with the provisions.

Several studies have carried out the variation in time of the parameter β , (Wu, 2020) posed a decreasing function with respect to the time of the form

$$\beta(t) = \beta_0((C_0 - C_b)e^{-r_1 t} + C_b) \quad \text{E.c.1.}$$

with β_0 as the infection rate without government measures, and the constants C_0 and C_b involve social contact (resulting from isolation from the population).

Also (Lin, 2020) proposes

$$\beta(t) = \beta_0 \left((1 - \alpha(t)) \left(1 - \frac{D(t)}{N} \right)^k \right) \quad \text{E.c.2.}$$

considering β_0 as the infection rate without measures, $\alpha(t)$ is the result of government actions represented as a constant function in chunks with a value interval between $[0, 1]$, $D(t)$ is the public sense of risk as a consequence of known critical cases and deaths, and k measures the intensity of the reaction of individuals.

In Santo Domingo de los Tsáchilas province, with an estimated population of 500 000, the authorities have put in place measures to try to slow the dynamics of the virus and, as expected, the population has responded in a variety of ways. This study will estimate values for the

parameters β , k , γ , θ and α considering the response of the province's citizens, the measures taken by the authorities and the political-social difference between China and the West, which can hardly be used its same parameters, but its same modelling ideas.

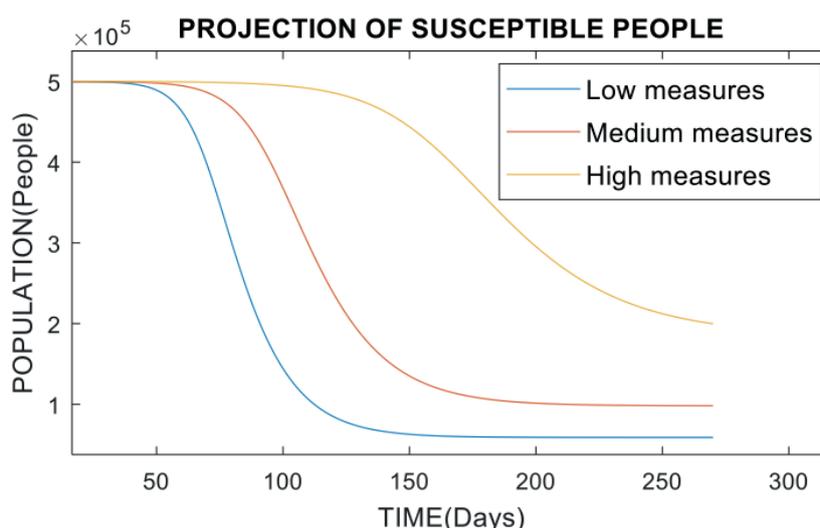
As an estimate for $D(t)$, 5% is considered, since this value represents the percentage of serious cases in the country of the total number of confirmed cases. In the value of the parameter k , some estimates are made with the information cited in (Lin, 2020) which suggests that "one can take $k = 1117.3$ " remembering that it measures the intensity of the reaction of individuals to everything that happens with the pandemic, then considering the political-social difference and the severity of its measures we will adopt a value of $k = 100$. The idea of the factor in which k is an exponent, is that when k is high, the concern is much and, the factor tends to 0, people isolate themselves even voluntarily and $\beta(t)$ is very small; but if the result of the factor is close to 1 it has little influence if the social concern is low.

Such that it is impossible to predict the future, we reiterate that we make estimates to analyze how the measures affect the evolution of the epidemic in the Tsáchila province; in particular, the changes in the value of α to show three scenarios, of how the epidemic would evolve from the rigor of the measures.

According to previous pandemics, the containment measures are really effective, they do not allow a very high peak curve and they move it away in time, but there is also the discipline of the population, obeying these measures would cause a positive effect in the battle against this silent but lethal enemy. So we will adopt a value $\beta_0 = 1.0$ and $k = 100$ we will proceed to vary α with three values $\alpha = 0.35$ (small measures), $\alpha = 0.5$ (medium measures) and $\alpha = 0.65$ (severe measures).

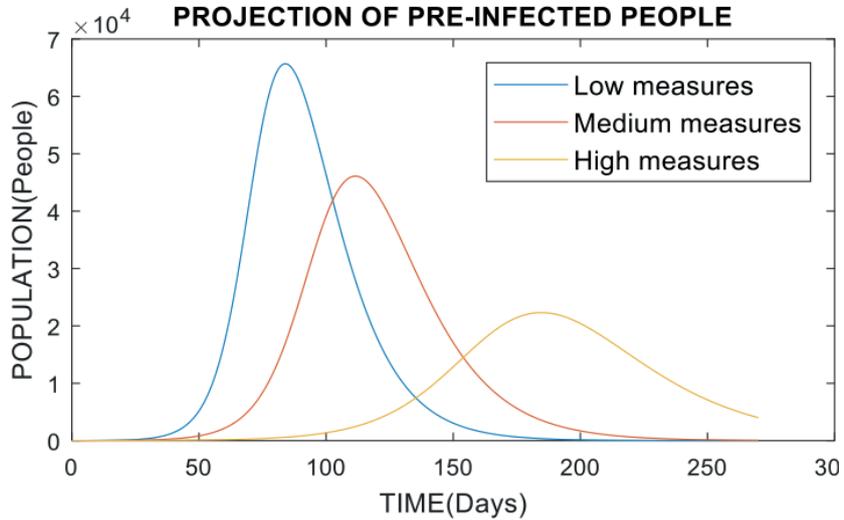
An example using the SEIR method is presented in Figure 7, with population $N = 500\ 000$ people, parameters $\beta = 1$, $\gamma = 1/5$, $\theta = 1/7$, $k = 100$ and $E(0)=10$; $I(0)=1$; $R(0)=0$.

Figure 7. Graph of the behavior of susceptible people, varying the type of government measures with $\alpha = 0.35$ (small measures), $\alpha = 0.5$ (medium measures) and $\alpha = 0.65$ (severe measures)



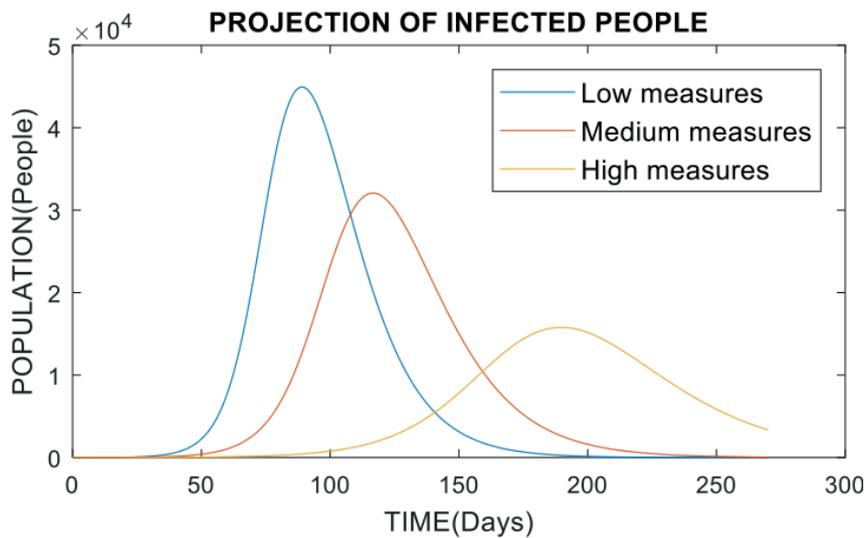
An example using the SEIR method is presented in Figure 8, with population $N = 500\ 000$ people, parameters $\beta = 1$, $\gamma = 1/5$, $\theta = 1/7$, $k = 100$ and $E(0)=10$; $I(0)=1$; $R(0)=0$.

Figure 8. Graph of the behavior of per-infected persons, varying the type of government measures with $\alpha = 0.35$ (small measures), $\alpha = 0.5$ (medium measures) and $\alpha = 0.65$ (severe measures)



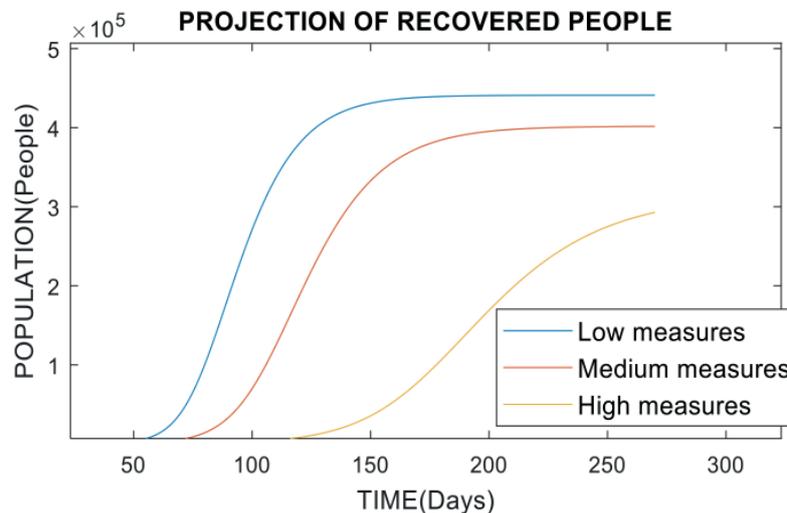
An example using the SEIR method is presented in Figure 9, with population $N = 500\ 000$ people, parameters $\beta = 1$, $\gamma = 1/5$, $\theta = 1/7$, $k = 100$ and $E(0)=10$; $I(0)=1$; $R(0)=0$

Figure 9. Graph of the behavior of infected persons, varying the type of government measures with $\alpha = 0.35$ (small measures), $\alpha = 0.5$ (medium measures) and $\alpha = 0.65$ (severe measures)



An example using the SEIR method is presented in Figure 10, with population $N = 500\ 000$ people, parameters $\beta = 1$, $\gamma = 1/5$, $\theta = 1/7$, $k = 100$ and $E(0)=10$; $I(0)=1$; $R(0)=0$.

Figure 10. Graph of the behavior of recovered persons, varying the type of government measures with $\alpha = 0.35$ (small measures), $\alpha = 0.5$ (medium measures) and $\alpha = 0.65$ (severe measures)



3. Findings

Various scenarios were modeled considering the measures adopted by the authorities $\alpha = 0.35$ (low measures), $\alpha = 0.5$ (medium measures) and $\alpha = 0.65$ (severe measures), the latter is the current scenario $\alpha = 3.23$ (95 % CI: 3 - 4) that by making a simple rule of three in relation to the unit, $\alpha = 0.646$ is obtained, in which possibly after 90 days we will have 497 044 susceptible, 808 exposed (pre-infected), 456 infected and, 1692 recovered. After 180 days you will have 355 958 susceptible, 22 119 exposed (pre-infected), 15 169 infected and, 106 753 recovered. After 270 days, you will have 199 828 susceptible, 4004 exposed (pre-infected), 3348 infected and, 292 820 recovered.

But for Table 1, the SEIR model was used to estimate the number of people infected in the province of Santo Domingo de los Tsáchilas considering that government measures will decrease over time since the country's economy has been affected by the falling oil prices and volatility in financial markets, which limits access to credits to cover tax debts and limits economic recovery and people will be forced to leave their homes despite the measures taken in time, with $N = 500\,000$ inhabitants, parameters $\beta = 1$, $\gamma = 1/5$, $\theta = 1/7$, $\alpha = 0.45$, $k = 100$ and initial values $E(0) = 10$; $I(0) = 1$; $R(0) = 0$. All values were obtained using adjustment techniques with the official information from the investigations cited above and from the National Risk Management System.

It is expected that the measures are maintained or are more rigorous due to what is coming for the country, we all need to work, but that public policies are created that do not allow the public health systems to collapse.

Table 1. Real cases and expected cases of infected people with $\beta = 1$, $\gamma = 1/5$, $\theta = 1/7$, $\alpha = 0.45$, $k = 100$.

Country: Ecuador; Province: Santo Domingo de los Tsáchilas					
Date	Total estimated cases	Total real cases	Date	Total estimated cases	Total real cases
19-mar	1.0	1	05-abr	19.5	34
20-mar	2.1	1	06-abr	21.7	36
21-mar	2.9	3	07-abr	24.3	43
22-mar	3.6	4	08-abr	27.1	44
23-mar	4.3	7	09-abr	30.3	46
24-mar	5.0	7	10-abr	33.8	51
25-mar	5.7	7	11-abr	37.7	55
26-mar	6.4	8	12-abr	42.1	60
27-mar	7.2	9	13-abr	47.0	65
28-mar	8.0	14	14-abr	52.5	66
29-mar	9.0	15	15-abr	58.6	67
30-mar	10.0	15	16-abr	65.5	68
31-mar	11.2	18	17-abr	73.1	76
01-abr	12.5	19	18-abr	81.6	79
02-abr	14.0	24	19-abr	91.1	81
03-abr	15.6	26	20-abr	101.7	94
04-abr	17.4	31			

This table shows the estimated number of infected persons and the number of actual cases in the province of Santo Domingo de los Tsáchilas from the first case confirmed.

4. Discussion and analysis

In table 2 has the mean values and the standard deviation of each variable, real and estimated cases of infected persons, being able to notice that in the real cases of infected persons the standard deviation is slightly higher (0.26197) with respect to the estimated cases, demonstrating a not considerable difference, guaranteeing even more the study because this value tends to (0).

Table 2. Descriptive analysis

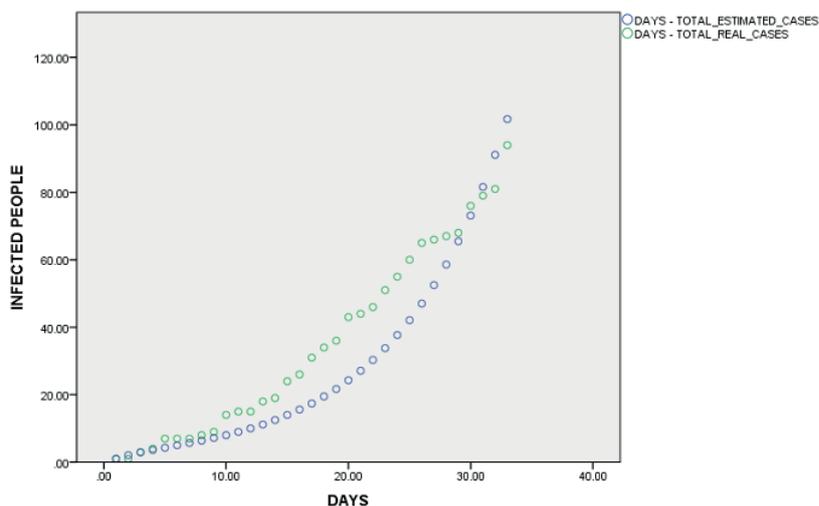
Descriptive statistics			
	mean	Standard deviation	N
TOTAL REAL CASES	28.5909	28.09184	33
TOTAL ESTIMATED CASES	35.5758	27.82987	33

In table 3 and figure 11 considers a correlation analysis between the variables, estimated infected persons and actual infected persons using SPSS, which shows a 96% correlation, considered by (Martínez Ortega, 2009) as "a strong to perfect correlation", which means that as the number of cases of actual infected persons increases, the number of estimated infected persons also increases.

Table 3. Correlation of variables, infected persons

Correlaciones			
		TOTAL REAL_CASES	TOTAL ESTIMATED CASES
TOTAL REAL CASES	Correlación de Pearson	1	.961**
	Sig. (bilateral)		.000
	N	33	33
TOTAL ESTIMATED CASES	Correlación de Pearson	.961**	1
	Sig. (bilateral)	.000	
	N	33	33

** . The correlation is significant at the 0.01 level (bilateral).

Figure 11. Correlation graph of infected people, real and estimated cases, using a point scatter diagram

5. Conclusions

It has been proven that if severe (effective) government measures are taken in Santo Domingo de los Tsáchilas, the behavior of the virus can be significantly contained, in turn allowing the “peak” in the infected curve to be smoothed out, thus moving it away in time. It is foreseen with these parameters obtained through adjustment techniques with the official information from investigations cited above and from the National Risk Management System ($\alpha = 0.65$) (government measures with severe 65 %), ($\beta = 1$) (rate of transmissibility), ($\gamma = 1/5$) (rate of recovery), ($\theta = 1/7$) (average of virus incubation), ($k = 100$) (intensity of reaction of individuals to the infection and number of deaths), to reach 15 169 infected people in 180 days from first confirmed case, being in the peak of the curve of infected people. Also, it must be considered that the effect of the measures is not immediate, it takes days to manifest itself according to the behavior of the population.

If we compare the severity values of the measures between ($\alpha = 0.45$) and ($\alpha = 0.65$), we will have less infected in the long term with a lower alpha value, this indicates that the contain-

ment measures taken by the authorities will allow public health systems not to collapse. While if we increase the rigor of the measures, we would have more infected in the long term but we would be able to stabilize the curve with fewer infected people, allowing health systems not to collapse.

The parameter α is obtained with some concrete dispositions taken by the local authorities, in the figure 14 it is evidenced as it would be the general behavior of the number of infected people according to the severity or effectiveness of the measures, it is impossible to know beforehand, we could only estimate after what has happened; but, in any way, the effect is going to be positive, and, if in the daily evaluation of the epidemiological data it is considered not sufficient for what it is tried to achieve, stricter measures can be arranged.

Table 1 shows the comparison of the real data of infected persons according to the National Risk Management System and the data estimated from our professional perspective with parametric data, having little dispersion and a 96% correlation. It shows what is happening at present and what could happen in the medium and long term.

When preparing the battle against this type of pandemic, the main objective is to reduce the effective reproduction factor of R_0 disease (flatten the curve). This influences the nature of the disease and how virulent the virus is. However, modelling and simulation reveal that there are additional factors that can be adjusted decisively for this decrease: social isolation, early detection and early mass diagnosis to rule out infected and better still pre-infected (epidemiological fence or asymptomatic people).

Having a specific scenario of social isolation (quarantine), it is expected to attack the spread of the virus in the population, reducing the early growth of the curves (not steep slope) of infected, therefore also of pre infected. This in turn is achieved with a massive identification of people confirmed with the virus, studying all people who have respiratory symptoms and not expecting people to develop serious symptoms, also all people within the epidemiological fence, they can be people asymptomatic infected. With this we avoid the blind contagion caused by asymptomatic people and, furthermore, considering that the majority of asymptomatic people have low viral load, this may be influenced by the reduction in the number of people in the intensive care units of the province and the country.

This research shows that accelerated decisions without scientific support in the face of this new coronavirus cause a rapid collapse in the public health system, and this got out of control by the unemployment rate is high. None of the measures taken by the authorities worked, and the police did not see them well; therefore, the number of infected increased exponentially. The media and the Ministry of Public Health do not show it because we are close to the presidential elections.

References

- Castro P, De los Reyes, J. C., González S, Merino P y Ponce J. (2020). *Modelización y simulación de la propagación del virus SARS-CoV-2 en Ecuador*. Centro de Modelización Matemática en Áreas Clave para el Desarrollo, MODEMAT. Recuperado el 11 de abril 2020, de <https://bit.ly/3ivLyNm>
- GadStoDgo. (2020). *Se suspenden los eventos masivos a nivel del Ecuador para evitar propagación del Coronavirus*. Gobernación de la Provincia de Santo Domingo. Recuperado el 13 de marzo 2020, de <https://bit.ly/3bZXV1u>
- Guan, W., Ni, Z., Hu, Y., Liang, W., Ou, C., He, J., Liu, L., Shan, H., Lei, C., Hui, D. S. C., Du, B., Li, L., Zeng, G., Yuen, K.-Y., Chen, R., Tang, C., Wang, T., Chen, P., Xiang, J., ... Zhong, N. (2020). Clinical Characteristics

- of Coronavirus Disease 2019 in China. *New England Journal of Medicine*, 382(18), 1708–1720. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2002032>
- Huang Ch, Y. W. (2020). Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *Lancet* 2020. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30183-5)
- Imai, N, Cori, A, Dorigatti, I, Baguelin, M, Donnelly, C, Riley, S, & Ferguson, N. (2020). Report 3: Transmissibility of 2019-nCoV. *Imperial College London*. <https://doi.org/10.25561/77148>
- INEC. (2010). *Resultados del Censo 2010 de población y vivienda en el Ecuador. Fascículo provincial Santo Domingo*. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Recuperado el 14 de marzo 2020, de <https://bit.ly/3mnjONl>
- INEC. (2020). *Empleo-diciembre 2019*. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Recuperado el 14 de marzo 2020, de <https://bit.ly/33ppVbi>
- Lauer, S. A., Grantz, K. H., Bi, Q., Jones, F. K., Zheng, Q., Meredith, H. R., Azman, A. S., Reich, N. G., y Lessler, J. (2020). The Incubation Period of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) From Publicly Reported Confirmed Cases: Estimation and Application. *Annals of Internal Medicine*, 172(9), 577–582. <https://doi.org/10.7326/M20-0504>
- Li, G., Wang, W., y Jin, Z. (2006). Global stability of an SEIR epidemic model with constant immigration. *Chaos, Solitons & Fractals*, 30(4), 1012–1019. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.09.024>
- Li, R., Pei, S., Chen, B., Song, Y., Zhang, T., Yang, W., & Shaman, J. (2020). Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV-2). *Science*, 368(6490), 489–493. <https://doi.org/10.1126/science.abb3221>
- Lin, Q., Zhao, S., Gao, D., Lou, Y., Yang, S., Musa, S. S., Wang, M. H., Cai, Y., Wang, W., Yang, L., & He, D. (2020). A conceptual model for the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in Wuhan, China with individual reaction and governmental action. *International Journal of Infectious Diseases*, 93, 211–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.02.058>
- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman. Caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2), 0–0. <https://bit.ly/3khZV8A>
- OMS. (2020). *Preguntas y respuestas sobre la enfermedad por coronavirus (COVID-19)*. Organización Mundial de la Salud. Recuperado el 15 de marzo 2020, de <https://bit.ly/3hVLYli>
- SNGR. (2020). *Informes de Situación e Infografías – COVID 19 – desde el 29 de Febrero del 2020*. Sistema Nacional de Gestión de Riesgos. Recuperado el 13 de marzo 2020, de <https://bit.ly/2RqGA8G>
- Wang, D., Hu, B., Hu, C., Zhu, F., Liu, X., Zhang, J., Wang, B., Xiang, H., Cheng, Z., Xiong, Y., Zhao, Y., Li, Y., Wang, X., & Peng, Z. (2020). Clinical Characteristics of 138 Hospitalized Patients With 2019 Novel Coronavirus-Infected Pneumonia in Wuhan, China. *JAMA*, 323(11), 1061–1069. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.1585>
- Wu, D., Wu, T., Liu, Q., & Yang, Z. (2020). The SARS-CoV-2 outbreak: What we know. *International Journal of Infectious Diseases*, 94, 44–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.03.004>
- Wu, J. T., Leung, K., & Leung, G. M. (2020). Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: A modelling study. *The Lancet*, 395(10225), 689–697. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30260-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30260-9)
- Zhu, N., Zhang, D., Wang, W., Li, X., Yang, B., Song, J., Zhao, X., Huang, B., Shi, W., Lu, R., Niu, P., Zhan, F., Ma, X., Wang, D., Xu, W., Wu, G., Gao, G. F., & Tan, W. (2020). A Novel Coronavirus from Patients with Pneumonia in China, 2019. *New England Journal of Medicine*, 382(8), 727–733. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2001017>

Evaluación de las deformaciones y su pronóstico en el Turbo Generador 5, de la planta termo-energética de Nuevitas, Camagüey

(Deformations evaluations and forecast in Turbo Generator 5 in the thermic-energetic plant of Nuevitas, Camagüey)

Michael Álvarez González¹, Vladimir Mederos Pérez², Miguel Ángel Hernández Machado³ y Rafael Matamoros García⁴

Resumen

La evaluación, el análisis y pronóstico del comportamiento de las deformaciones en el Turbo Generador 5, de la planta termo-energética de Nuevitas, fue el objetivo central de esta investigación. Para ello fueron realizadas mediciones geodésicas de control de asentamiento, cronológicamente distribuidas en el tiempo a marcas específicas en la estructura. Estos datos, junto a la modelación físico-numérica por medio del Método de los Elementos Finito, permitió evaluar el proceso de interacción carga-deformación e interacción suelo estructura. Luego de lograr un registro histórico del comportamiento tenso-deformacional plano, se realizó un pronóstico de las deformaciones en la losa de apoyo por medio de Modelos Arima, para evaluar a corto plazo las desalineaciones futuras permisibles, registradas sistemáticamente en los ejes de los rotores del sistema mecánico del turbo generador.

Palabras clave

Geodesia, carga-deformación, interacción suelo estructura, método de los elementos finitos, modelos Arima.

Abstract

The evaluation, analysis and deformations forecast in the Turbo Generator 5 of the water heater-energy plant of Nuevitas, it was the main objective of this research. For they were carried out it chronologically geodesic surveying to establishment control record distributed in same time period to specific marks along the structure. These data were used in the physical-numeric models, by Finite Elements Method, it allowed evaluate the load-deformation process and floor-structures interaction. After achieving the historical record of stress-strain plane state, forecast deformations was proposing for the support structure by Arima's models to evaluate in short term the not-alienations permissible future registered systematically in the axes of the mechanical system rotors in the plant.

Keywords

Geodesy, load-deformation, finite element method, soil-structure interaction, Arima model

1. Introducción

El estudio y control de las deformaciones en obras de ingeniería, implica una garantía de seguridad durante el proceso de puesta en marcha, explotación y mantenimiento operativo. Este elemento recobra mayor relevancia aun cuando se trata de elementos de la geodesia ingeniera, al considerar que las precisiones requeridas rondan sobre las unidades y hasta fracciones del milímetro.

En plantas de generación energética a partir de turbo generadores por combustión, generalmente se crea una amplia red de control de las deformaciones; tanto a toda la estructura

1 Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC), Santa Clara. Villa Clara, Cuba. [michael@vc.hidro.cu], <https://orcid.org/0000-0003-2953-4762>

2 Grupo Empresarial Geocuba Villa Clara – Sancti Spiritus, Santa Clara. Villa Clara, Cuba. [vmederos@vcl.geocuba.cu], <https://orcid.org/0000-0001-6043-3834>

3 Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara. Villa Clara, Cuba. [mihmachado@uclv.cu]

4 Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara. Villa Clara, Cuba. [rmatamoros@uclv.cu]

de soporte como al terreno circundante. En el presente trabajo se exponen los resultados alcanzados durante una serie de trabajos de control geométrico a partir de una serie de fallas y reparaciones costosas, que fueron realizadas a la planta, comenzando con la desalineación sistemática de los ejes y rotores del Turbo Generador 5 (TG5) de la Termo Eléctrica "10 de octubre" en Nuevitas, Camagüey (véase la figura 1).

Figura 1. Ubicación general de la Termo Eléctrica "10 de octubre" en Nuevitas, Camagüey.



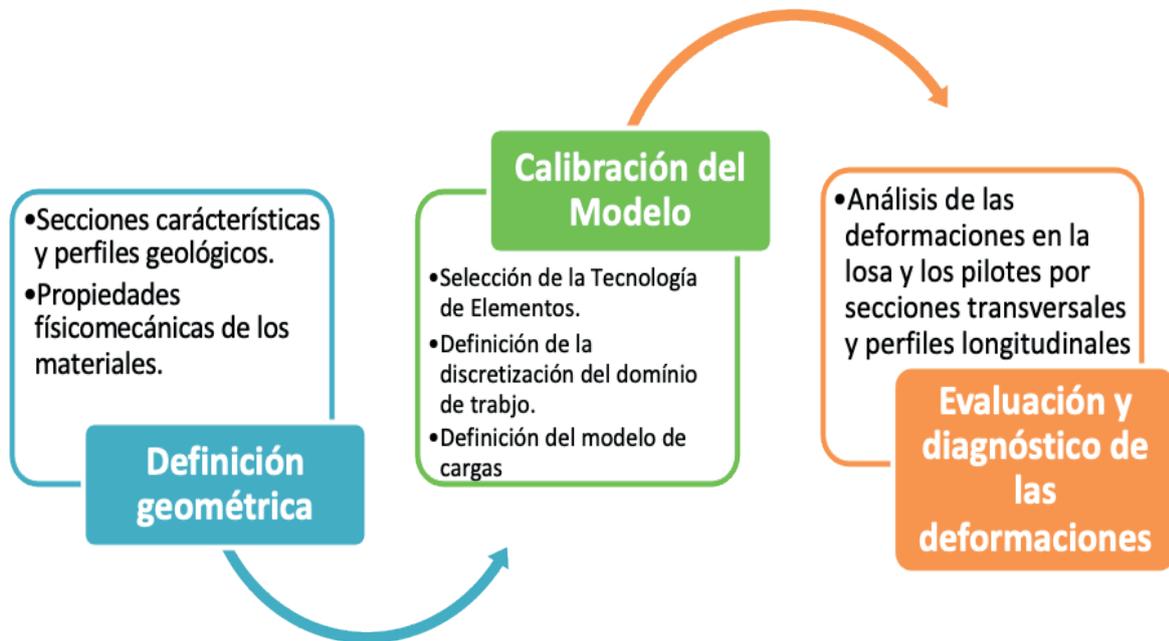
Fuente: Google Earth

Este trabajo tuvo por objetivo realizar un diagnóstico ingeniero geodésico, su posterior evaluación y pronóstico de las deformaciones, por medio de la modelación físico-numérica con el Método de los Elementos Finitos (MEF) del Turbo Generador 5 (TG5), en su interacción con las cargas actuantes entre la losa soportante y el suelo de la Termo Eléctrica de Nuevitas en la ciudad de Camagüey.

Las bases teóricas sobre las cuales se fundamentó esta investigación, se justifican a partir de varios estudios publicados sobre las deformaciones en obras ingenieras (Álvarez, 2018; Blanco, Pacheco & Moreno, 2020; Delgado, 2011; Hernández, 2012; Kopáčik, Erdélyi & Kyrinovič, 2020a, 2020b). Para lograr este objetivo se propone la ejecución de los procesos investigativos, acorde a la filosofía de análisis propuesta en la figura 2, en el que se realiza un primer momento en la definición de las secciones transversales y perfiles geológicos, correspondientes a la distribución espacial, conforme a la influencia y alcance que se pretende abarcar en el presente diagnóstico. Además de establecer los parámetros físico-mecánicos de los materiales utilizados, tanto en la construcción como en el suelo donde se encuentra el TG5.

El esquema propuesto se basa en las experiencias previas por parte de investigadores de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, contenidas en diversos campos de la ingeniería (L. Álvarez, 1998; Álvarez, 2018; Quevedo, 2001a, 2001b; Recarey, 1999).

Figura 2. Esquema general de trabajo para la simulación, evaluación y diagnóstico de las deformaciones en el TG5



En un segundo momento se desarrolló un proceso de calibración del modelo, en el que se definió la Tecnología de Elementos Finitos (TEF), a utilizar según la geometría del dominio de trabajo, en función del proceso de discretización o subdivisión de la malla utilizada en el modelo conceptual. Ello permitió arribar a un tercer momento, con una comparación de la curva de presión ejercida por la estructura al suelo y un chequeo del comportamiento del trabajo de los pilotes y la losa portante de la estructura.

2. Metodología

Selección y definición geométrica de las secciones transversales y perfiles geológicos

En la figura 3 se representan los dos ejes principales, acorde a la distribución espacial de la losa y los pilotes, acotadas todas las dimensiones en unidades métricas (m).

En la figura 4 son representadas las vistas en corte por los ejes izquierdo y derecho, con el acople de los perfiles geológicos, según las capas identificadas por las calas, realizadas en los datos previos suministrados por el cliente.

En el proceso de la conformación y definición de las secciones geométricas se decidió realizar los análisis de modelación, por medio de los ejes izquierdo (estos son denominados con el símbolo ['']) y derecho, según se identifica en la figura 4, que representa el ensamblaje de los modelos, por ser los más representativos del trabajo tenso-deformacional de la losa, a todo lo largo y no en pequeñas secciones transversales, lo cual es muy útil en el caso de que se pretenda realizar estudios más localizados, si es que se identifica algún comportamiento de anomalías (fisuras o grietas, zona de acumulación de tensiones, etc.).

Figura 3. Esquema general de las dimensiones principales y ejes del TG5

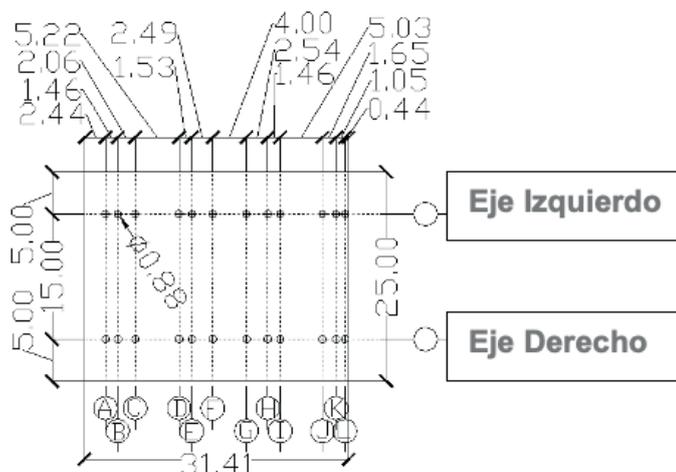
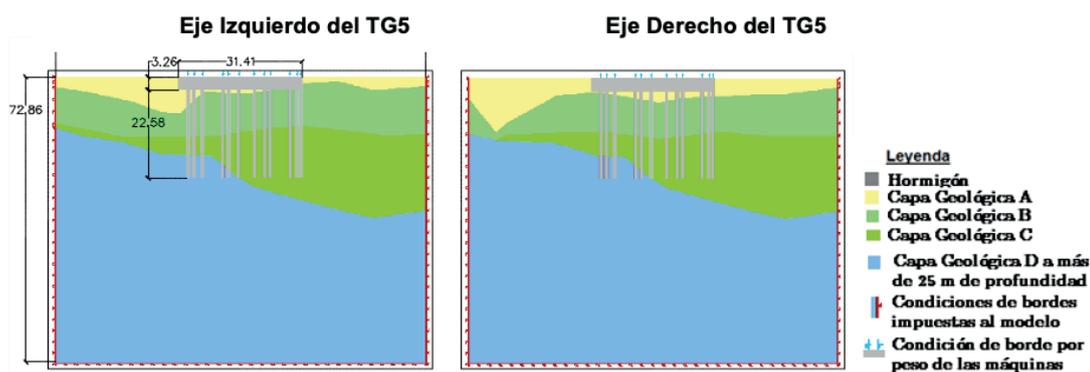


Figura 4. Esquema general de los perfiles de trabajo por los ejes izquierdo y derecho en el TG5

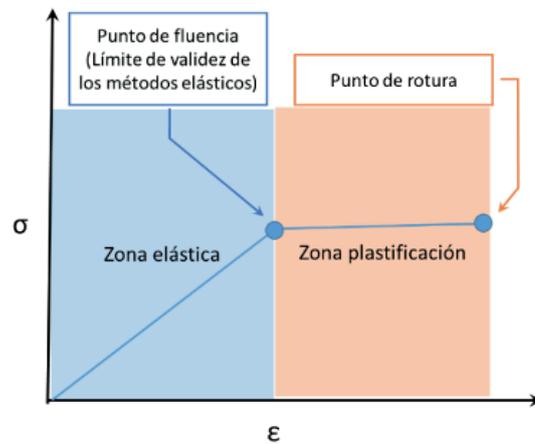


Además, se anexa a continuación la tabla 1, en la que se identifican las capas geológicas y los parámetros físico-mecánicos, utilizados en el proceso de modelación de los materiales del suelo y del hormigón, según se muestra en la figura 5.

Tabla 1. Parámetros físico-mecánicos utilizados en el proceso de modelación físico-numérica de los materiales, en los modelos correspondientes a los ejes izquierdo y derecho

Parámetros	Modelos/Materiales					
	Lineal Elástico	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico	Elasto-Plástico
	Hormigón	CGA	CGB	CGC	CGD	CGD+25 m
Módulo de Young (E) (kPa)	28000000	15000	14000	21000	23000	38000
Peso unitario (kn/m ³)	2.5	2.7	2.75	2.77	2.72	2.71
Módulo de Poisson	0.3	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
Módulo de cohesión (kPa)	-	90	97	124	144	360
Ángulo de fricción (°)	-	8	5	1	9	5
Ángulo de dilatación (°)	-	8	5	1	9	5

Figura 5. Representación del comportamiento de un modelo elasto-plástico, de los materiales del suelo



Fuente: (Álvarez, 2018:107)

En la tabla 2 se listan las cargas concentradas al realizar una distribución físico-geométrica de las masas correspondientes al equipamiento tecnológico colocado sobre la losa. Se calculó la carga correspondiente, que se generaba sobre cada pilote desde la superficie de la losa soportante.

Tabla 2. Cargas concentradas asignadas a la losa soportante geoméricamente sobre los pilotes

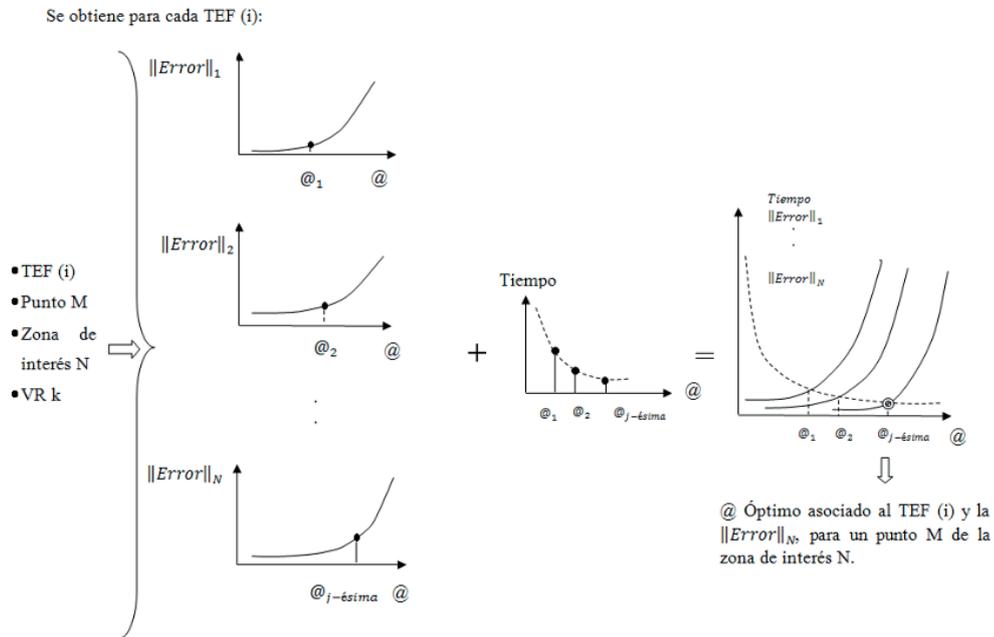
No. Pilote	Carga concentrada (kN)	No. Pilote	Carga concentrada (kN)
1-1'	1392.90	7-7'	1076.40
2-2'	1366.20	8-8'	1029.80
3-3'	1327.70	9-9'	1084.00
4-4'	1227.60	10-10'	906.37
5-5'	1199.90	11-11'	875.84
6-6'	1152.00	12-12'	855.35

Para el proceso de selección de la Tecnología de Elementos Finitos (TEF), a utilizar en la modelación como proceso de calibración numérica del modelo. En el proceso de selección de la forma geométrica del TEF fue descartado el uso del elemento rectángulo, por no ajustarse correctamente a zonas en la distribución geométrica y calcular un error en la plataforma utilizada, que no se ajusta a la malla con los requisitos previamente determinados por el autor durante el proceso de selección de la TEF (figura 6).

Se realizó la siguiente propuesta para simplificar la nomenclatura de la TEF:

- DimTE1-@m → Malla de rectángulos y triángulos con nodos auxiliares, donde @ es la dimensión global de cada elemento en el proceso de iteración.
- DimTE2-@m → Malla de triángulos sin nodos auxiliares, donde @ es la dimensión global de cada elemento en el proceso de iteración.

Figura 6. Procedimiento para la obtención de la densidad de malla óptima utilizada, para un tipo de elemento finito



Fuente: (Álvarez, Mesa, & Recarey, 2012)]

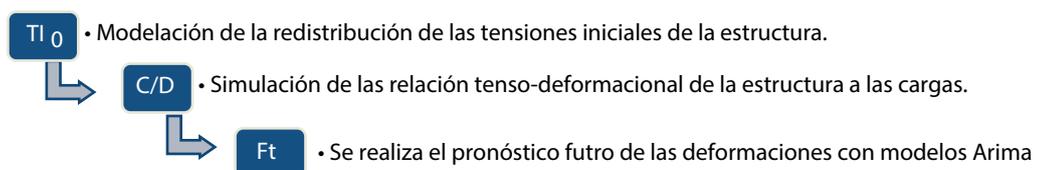
3. Resultados

Resultados obtenidos empleando el Método de los Elementos Finitos (MEF), esquema de análisis de modelación y datos iniciales

En este acápite se procede a realizar una estrategia de evaluación de los resultados alcanzados por los modelos físico-matemático-estadísticos, empleados para determinar el comportamiento histórico de las deformaciones, registradas por métodos geodésicos en la losa soportante del Turbo Generador 5.

Acorde a lo anteriormente planteado, se decidió asumir la estrategia de modelación (véase figura 7), en la que se determinó el proceso de redistribución de las tensiones, para el comportamiento de la sección típica correspondiente al área de estudio segmentada en dos secciones longitudinales principales, para abarcar todo el largo de la losa, pasando por los centros de los pilotes.

Figura 7. Representación gráfica de la estrategia de modelación a seguir durante la simulación con el Método de los Elementos Finitos



Fuente: (Álvarez, 2018).

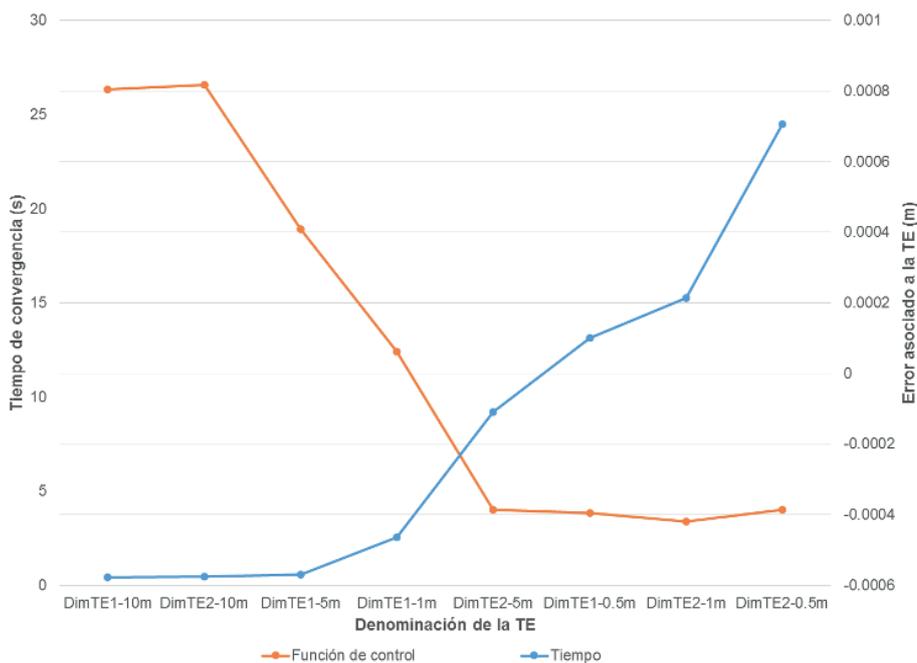
Para determinar la estabilidad del modelo físico-numérico, utilizado en el proceso de modelación, así como la TEF seleccionada, se realizó un paso de calibración para garantizar la convergencia numérica en función de la reducción del coste computacional, tipo de elemento numérico, error asociado a la tecnología y tiempo de convergencia (véase figura 8).

En este paso se consideraron dos tipos de TEF, triángulos solo, cuadriláteros y triángulos, optando por la TEF, que presentó el menor error alcanzado, en referencia a la norma del valor real medido y normalizado por el valor patrón de menor error de desplazamiento numérico, alcanzado en las diferentes corridas de los modelos. Es por ello la selección del menor error posible bajo el criterio del menor costo computacional o tiempo de procesamiento de los datos, durante el proceso de convergencia numérica, lo cual permitió realizar una selección aceptable, acorde a un balance entre el mínimo posible de tiempo de convergencia y error probable, en el proceso de cálculo basado en las experiencias de Álvarez, Mesa y Recarey (2012).

Es por ello que, para abordar el proceso de las deformaciones en la estructura, se optó por la combinación de cuadriláteros y triángulos, con un orden de integración de cuarto orden y tercer orden respectivamente para cada elemento, y todos con nodos auxiliares, dado que al incrementar el orden de integración, se mantiene el error constante y solo se aumenta el costo computacional durante el proceso de solución del problema de contorno, a lo largo del dominio del medio continuo que se investiga, añadiendo un elemento de interface, como resultado de un refinamiento de la malla en las proximidades de los pilotes, en un valor relacional de ¼ de unidad, a la dimensión de desratización del dominio o malla.

Por lo que se decidió realizar la modelación con la TEF Primera de Dimensión 1 m (DimTE1-1 m), compuesta por cuadriláteros y triángulos, refinada en áreas próximas a los pilotes, a razón de 0.4 m, con elementos de interface para aproximar lo mejor posible la respuesta del modelo al fenómeno de fricción entre los pilotes y el suelo (véase figura 8).

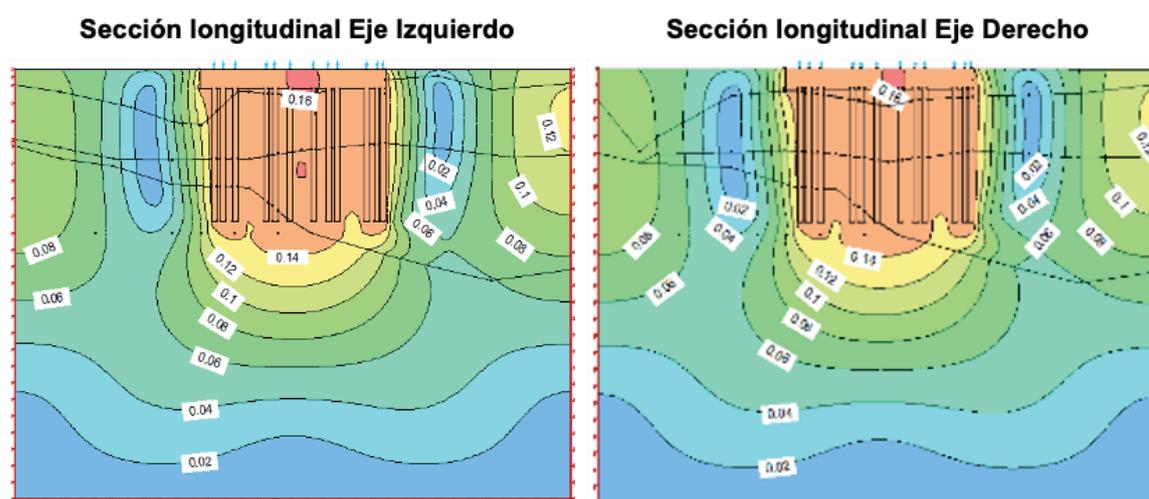
Figura 8. Representación gráfica del proceso de selección de la tecnología de elementos a emplear en el modelo físico-matemático



Análisis de los resultados del modelo de Tensiones Iniciales (Tlo)

En este acápite se analizó el comportamiento del estado inicial de las dos secciones longitudinales, por los ejes izquierdo y derecho de la estructura, para poder estimar inicialmente los parámetros esperados del comportamiento del material, acorde a los criterios de diseño inicialmente asumidos para la estructura, así como el comportamiento de las tensiones iniciales a las que el material se encuentra sometido por condición de peso propio, descartando todo criterio de posible acción o interacción por factores externos, según las condiciones iniciales impuestas al modelo (véase la figura 9).

Figura 9. Representación gráfica de las condiciones iniciales del modelo Tlo



Leyenda

-  Condición de borde con restricción en el movimiento horizontal.
-  Condición de borde con restricción de desplazamiento en las componentes vertical y horizontal.

En un primer instante se verificó el comportamiento del embudo de presiones, ejercido por la estructura bajo el principio de peso propio y como un criterio valorativo, según las normas norteamericanas para la mecánica de suelo y el diseño de cimentaciones profundas (Jones, 1986a, 1986b), y otros criterios similares contenidos en varias investigaciones (Craig, 1997; Naranbat, 2009).

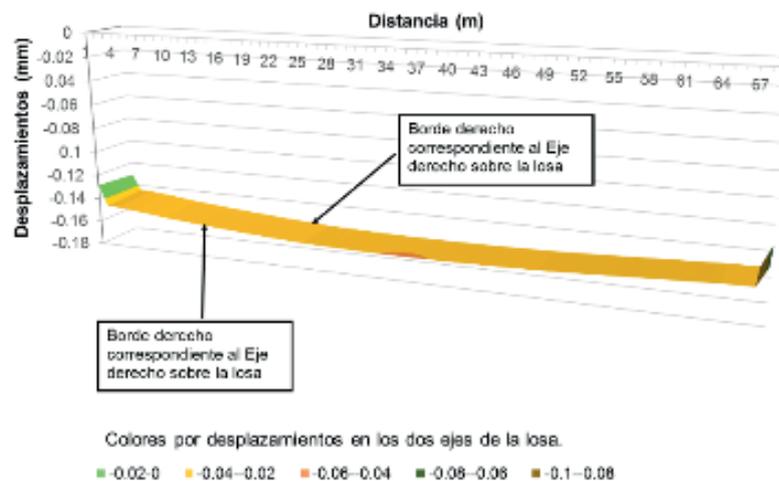
Al evaluar visualmente el embudo de presiones bajo la estructura, se confirma que las características físico-geométricas, asumidas en el modelo, fueron correctas, pues se identificó el cierre del embudo de presiones con la relación de la dimensión del dominio y su discretización, conforme al estudio comentado en el acápite previo.

Al realizar un breve análisis de la respuesta de la superficie que se obtuvo en la figura 10, se identificó que fueron tomados nodos externos por fuera de la losa objeto de estudio, para visualizar el inicio y fin de la misma, la cual está identificada a partir del cambio de concavidad brusco, que realiza la superficie creada entre el borde de línea de los ejes izquierdo y derecho.

Además, se decidió realizar una verificación de la superficie creada entre los dos perfiles longitudinales, para evaluar si existe algún proceso de torsión en la losa, a partir de un posible

trabajo diferencial de los pilotes, en el proceso de disipación de las cargas a las cuales está sometida la estructura, razón por la cual, al visualizar de forma ortogonal la superficie desde una perspectiva frontal, se identificó una zona donde se esperó aparecieran las deformaciones máximas en el centro cercano a los pilotes E, F y G del eje derecho de la losa, según el perfil longitudinal asumido en la presente investigación.

Figura 10. Representación gráfica de los desplazamientos esperados, resultantes del modelo Tl₀ vista en perspectiva



Análisis de los resultados del modelo de Carga Deformación (C/D)

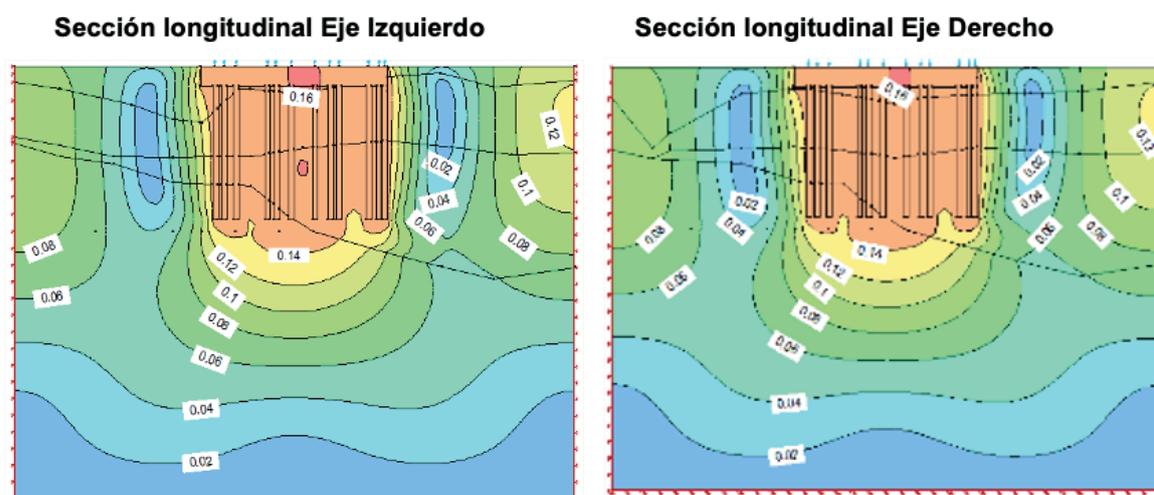
En este paso fueron impuestas las cargas concéntricas sobre los centros geométricos de los pilotes, espacialmente distribuidas, acorde a la distribución de las masas sobre la losa, con base en que los datos máximos de deformaciones esperados ya se conocían, y han sido caracterizados y medidos por técnicas de la geodesia, con la adición de las tensiones iniciales del modelo Tl₀ al final del cálculo, para arribar teóricamente al estado tenso-deformacional actual en el que se encuentra la estructura.

En esta etapa se procedió a verificar el comportamiento del embudo de presión, ejercido bajo la losa y en los entornos cercanos a los pilotes, según se representa en la figura 11; y se coincide, prácticamente, con los datos estimados de manera previa en el modelo Tl₀, por lo que, al no haber valores anómalos en las curvas de presión estimada por el modelo C/D, se constata que los pilotes están trabajando correctamente a fricción, para transmitir de forma homogénea las cargas soportadas por la losa al suelo.

Luego de haber comprobado el correcto funcionamiento de los pilotes, se realizó una verificación al comportamiento geométrico de la losa, dado que se espera una deformación máxima en el centro de la misma, próxima al extremo derecho, según se estableció como sistema de referencia en el modelo geométrico utilizado en el presente diagnóstico.

Al comparar los resultados alcanzados durante el proceso de modelación para la realización del diagnóstico de los estados de deformaciones de la losa, se decidió representar el comportamiento de los desplazamientos, como se muestra en la figura 12, la cual registra valores de los desplazamientos máximos para 16 mm, resultantes en el modelo C/D similar al Tl₀.

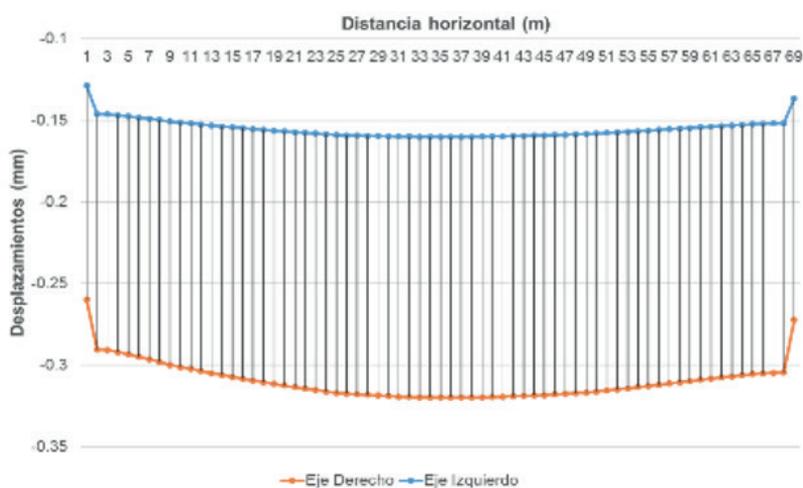
Figura 11. Representación gráfica de las condiciones finales del modelo C/D



Este aspecto permitió corroborar que la losa trabaja de manera uniforme, a pesar de que la zona de torsión, esperada en los seis primeros metros, se localizó como punto medio alrededor de los 11.36 m, desplazándose aproximadamente unos 2 mm más, respecto a la media de las deformaciones circundantes, con una leve inclinación hacia la derecha, según la distribución de masas aplicada sobre la estructura y por encontrarse el turbo generador eléctrico en esta zona.

A fin de evaluar el comportamiento de las diferencias de los desplazamientos registrados en los ejes izquierdo y derecho, se decidió representar ambos perfiles longitudinales, contrastados entre sí para poder verificar, en función de la distancia, si existen desplazamientos diferenciales que puedan conducir a una posible falla, según se muestra en la figura 12, en la cual se muestra las diferencias que se obtuvo, las cuales no superan los 0.002 m en los puntos de mayor diferencia de cota entre los perfiles. Este aspecto implica que la losa soporta las cargas y manifiesta los desplazamientos registrados por métodos geodésicos de control de las deformaciones, sin que se identifique daños estructurales.

Figura 12. Representación gráfica de los desplazamientos en la losa por los perfiles longitudinales de los ejes izquierdo y derecho



Además, al comparar los datos obtenidos, según los valores técnicos medidos en la Red Geodésica de Vigilancia y Control Técnico de las Deformaciones, se identificó que las diferencias del modelo C/D no superan los 0.002 m, respecto a los datos medidos en campo, lo cual permite establecer márgenes de confiabilidad real entre los modelos teóricos y las mediciones de campo, para el presente diagnóstico.

Pronóstico de las deformaciones

Para el pronóstico de las deformaciones se consideraron fundamentalmente las experiencias publicadas por varios autores (Álvarez, 2018; Álvarez, Álvarez & Vázquez, 2017; Feigl et al., 2020), en el uso de modelos Arima, y luego de obtener una serie de mediciones de los desplazamientos geodésicos, como la respuesta de la deformación en el suelo o datos térmicos, hidrológicos y mecánicos registrados en la superficie terrestre. Es por ello que, para el pronóstico de las deformaciones, se consideraron los datos iniciales medidos en cada uno de los ciclos, según se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Ejemplo de los datos utilizados para el cálculo de los modelos de pronóstico

Ciclo	Fecha del ciclo	Meses acumulados	Días	H'1 ⁵ (mm)	H'1-2 (mm)	H1 (mm)	H1-2 (mm)
1	12/10/1983	0	0	0	0	0	0
2	12/11/1985	23	8395	-4.6	-4.9	-5.0	-5.2
3	24/11/1987	46	16790	-10.9	-11.4	-12.0	-12.1
4	12/11/1988	58	21170	-15.7	-16.3	-17.0	-17.3
5	20/10/1989	69	25185	-17.5	-18.0	-18.9	-19.2
6	06/12/1990	83	30295	-19.1	-19.8	-20.5	-21.4
7	10/05/1991	88	32120	-17.5	-18.6	-19.3	-19.8
8	10/04/1992	99	36135	-17.5	-18.7	-19.3	-19.8
9	20/11/2007	286	104390	-55.1	-56.9	-59.0	-60.8
10	06/08/2009	307	112055	-55.6	-57.3	-58.9	-60.9
11	15/05/2010	316	115340	-56.3	-58.0	-59.9	-61.9
12	29/06/2011	329	120085	-56.7	-58.3	-60.7	-62.6
13	25/04/2014	364	132860	-58.8	-60.5	-62.5	-64.9
14	19/12/2015	384	140160	-59.7	-61.6	-63.6	-65.7

Para poder utilizar la teoría de series cronológicas (Box, 2015; Box & Jenkins, 1970), fue necesario realizar una interpolación de datos por medio de un *spline bicúbico* (consultar la figura 13). Este proceso facilitó la obtención de una serie de datos continuos ordenados cronológicamente, según se muestra en la figura 14, en la que se detalla el proceso de interpolación, durante los 187 meses en los que no fueron realizadas mediciones.

Además, es necesario aclarar que, los pronósticos realizados fueron en consideración a 5 años, posteriores a la fecha del último ciclo, con una ventana de control de 1 año de solape,

5 Los datos que contienen el símbolo prima Ej.: H'1, corresponden al eje izquierdo y los que no poseen este símbolo corresponden al eje derecho.

para verificar el posible error entre el valor pronosticado por el modelo y los datos medidos e interpolados (ver tabla 4).

Figura 13. Representación gráfica del proceso de interpolación de datos y su control numérico

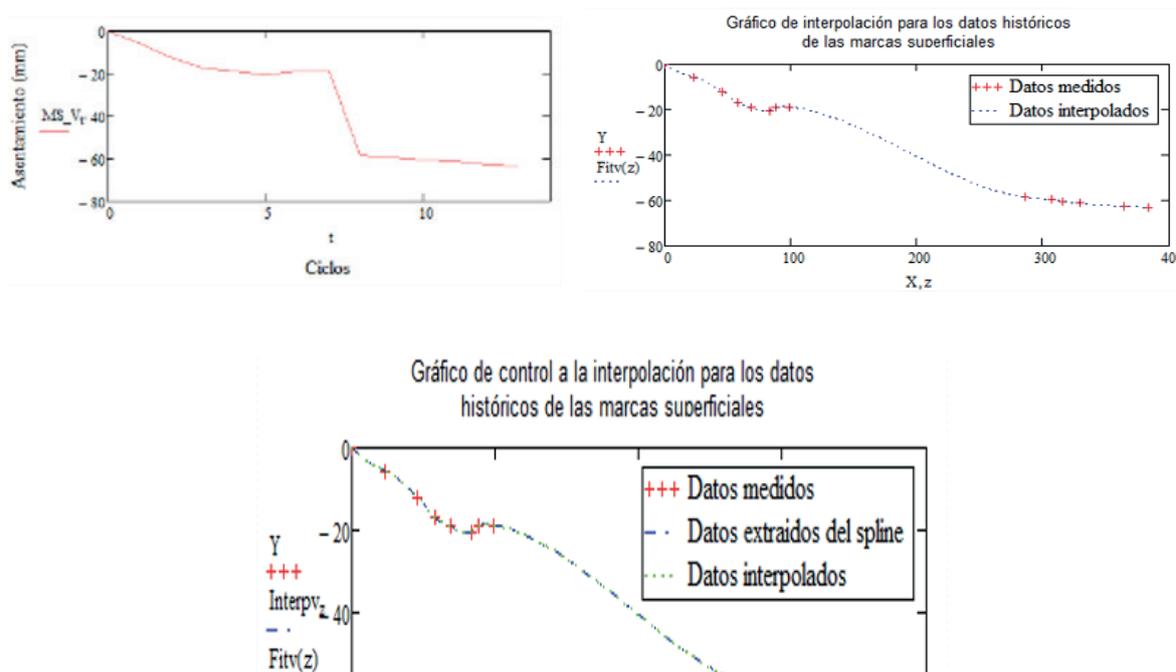


Figura 14. Representación gráfica del modelo de pronóstico, con los intervalos de confianza para la marca H'1

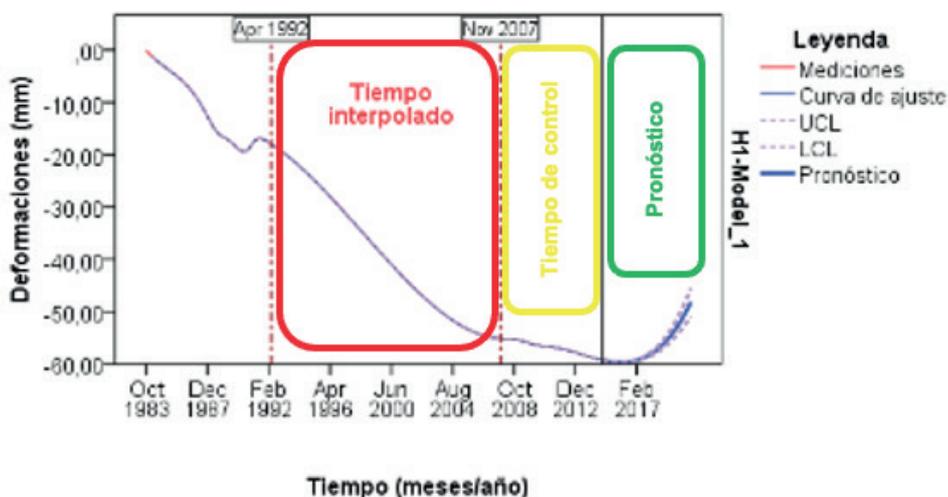


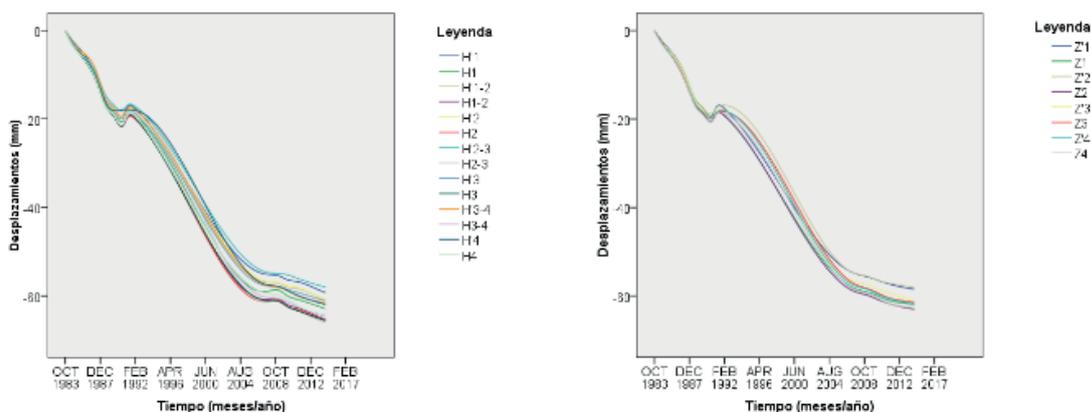
Tabla 4. Cálculo del error obtenido en el pronóstico, respecto a los datos reales medidos e interpolados para la marca superficial H'1

Fecha (mes/año)	Pronóstico (mm)	Dato real e interpolado (mm)	Diferencias (mm)
Oct. 2014	-59.2792	-59.2792	0.0000
Nov. 2014	-59.3302	-59.3302	0.0000
Dic. 2014	-59.3787	-59.3787	0.0000
Ene. 2015	-59.4246	-59.4246	0.0000
Feb. 2015	-59.4678	-59.4679	0.0000
Mar. 2015	-59.5082	-59.5082	0.0001
Abr. 2015	-59.5456	-59.5457	0.0001
May. 2015	-59.5798	-59.5800	0.0001
Jun. 2015	-59.6108	-59.6110	0.0002
Jul. 2015	-59.6384	-59.6387	0.0003
Aug. 2015	-59.6624	-59.6628	0.0004
Sep. 2015	-59.6828	-59.6833	0.0005
Oct. 2015	-59.6993	-59.7000 ⁶	0.0007

Como se muestra en la tabla 4, los errores asociados al modelo, en el año de control establecido para la serie cronológica, presentaron diferencias insignificantes, consideradas como errores blancos, por lo que fue factible el pronóstico realizado para el periodo de 5 años, si se considera que las condiciones tenso-deformacionales del modelo, acorde al estado actual de sollicitación de la losa, no varíen.

Para poder inspeccionar si la losa posee un comportamiento uniforme, se representó todos los desplazamientos en un gráfico cronológico, según se muestra en la figura 15. En este caso, se evidencia una leve dispersión de los desplazamientos en el último ciclo, por lo que implica posibles comportamientos generados, a partir de la no coincidencia de la geometría del centro de masa, de las cargas colocadas sobre la losa, respecto a la distribución de los pilotes.

Figura 15. Representación gráfica del comportamiento de los desplazamientos de la losa



6 Este dato corresponde a una medición real realizada por el Grupo Empresarial de Geocuba VC-SS; el resto, contenido en esta columna, son datos interpolados por el método del *spline bicúbico*, con un estricto control de los errores numéricos y su control de propagación de errores.

A continuación, se realiza un ejemplo completo con los resultados de obtención y pronóstico del modelo para la marca H'1 (ver tabla 5, tabla 6 y figura 16).

Tabla 5. Datos generales del modelo físico-matemático-estadístico

Descripción del modelo			
			Tipo de modelo
Modelo ID	H'1	Model_1	Arima(3,5,3)(0,0,0)

Estadística del modelo						
Modelo	Cantidad de predictores	Est. del ajuste del modelo	Ljung-Box Q(18)			Cantidad de pronósticos
		R-cuadrado estacionario	Estadística	DF	Sig.	
H'1-Modelo_1	1	1.000	51.364	12	0.000	69

Figura 16. Representación gráfica del pronóstico de los desplazamientos para la marca superficial H'1

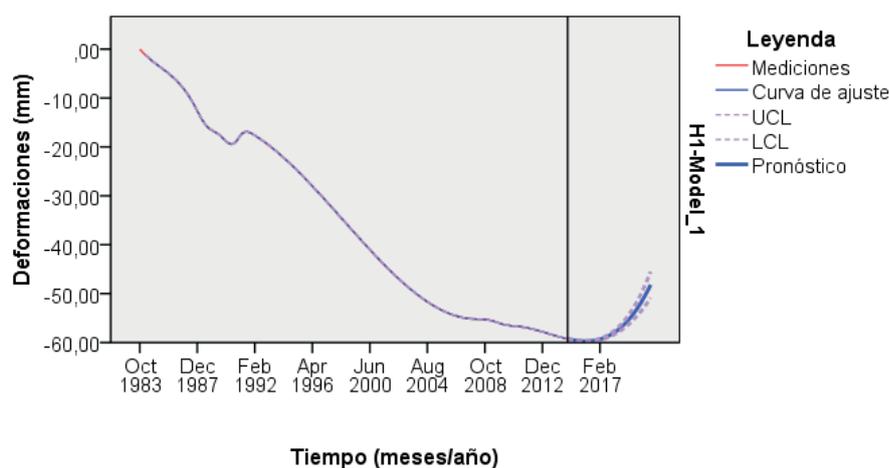
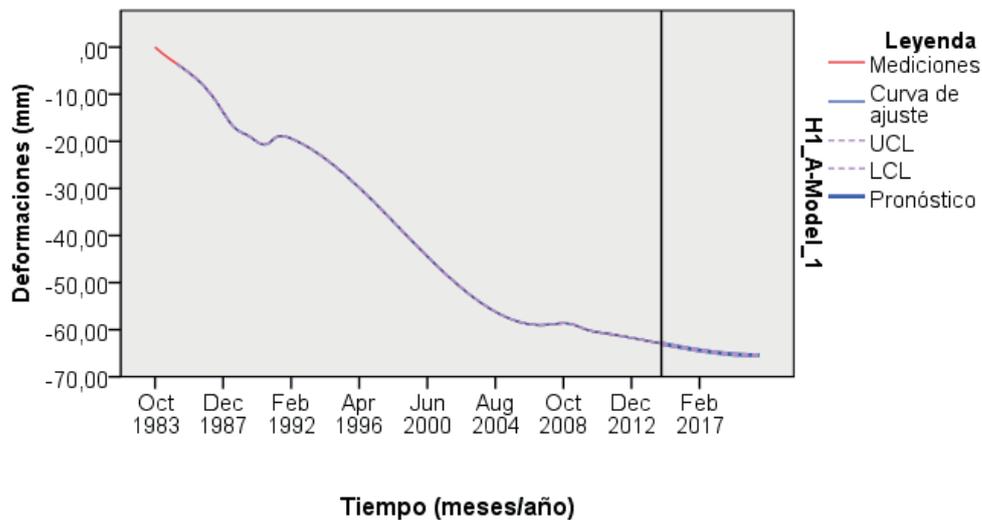


Tabla 6. Ejemplo de los resultados alcanzados en el pronóstico de la marca superficial H'1

Modelo		Nov. 2018	Dic. 2018	Ene. 2019	...	Sep. 2020	Oct. 2020
H'1-Modelo_1	Pronóstico	-56.3132	-56.0774	-55.8320	...	-48.6812	-48.1994
	ICS	-55.5858	-55.2988	-54.9998	...	-46.1215	-45.5143
	ICI	-57.0405	-56.8559	-56.6642	...	-51.2409	-50.8845

Similar proceso fue realizado para todas las marcas superficiales, de las cuales solo serán presentadas las gráficas de pronósticos finales (figura 17), omitiendo todo el tecnicismo matemático-estadístico implementado de similar rigurosidad en el proceso de cálculo y estimación de datos.

Figura 17. Representación gráfica del pronóstico de los desplazamientos para la marca superficial H1



5. Conclusiones y recomendaciones

Acorde a los resultados alcanzados, se arribaron a las siguientes conclusiones:

- Al comparar los resultados teóricos, obtenidos en función del comportamiento de los niveles de surgencia de la LCS teórica después de la colocación del filtro, en contraste a los estudios previos realizados, se obtuvo resultados superiores a -1.00 m de disminución del nivel freático teórico registrado en las diferentes calas de control y piezómetros.
- En las modelaciones de los diferentes filtros, se alcanza una reducción del caudal, que pasa por la estructura de la cortina y la base de cimentación. Estos datos fueron comparados con los medidos delante del filtro y los valores teóricos alcanzados en los modelos virtuales, después de la colocación de las variantes de solución. Los resultados obtenidos fueron múltiples valores de gastos, con una diferencia no mayor de $2.5E-06$ m³/s, como se evidencia en el proceso de redireccionamiento del flujo en el interior de la cortina, por el correcto funcionamiento de la propuesta de los nuevos filtros, expresado en términos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.
- Al realizar el análisis de la estabilidad de taludes para los diferentes escenarios, se obtienen resultados que superan el valor normativo como criterio mínimo para el Factor de Seguridad del talud, por lo que se ratifica como válida la solución de ingeniería empleada en el talud, aguas abajo de la cortina en el embalse Zaza. Se recomienda la construcción del filtro de tipo prisma, por ser muy fácil su ejecución constructiva, por parte de las empresas constructoras especializadas en trabajos hidráulicos a nivel nacional.

Referencias

- Álvarez, J., Mesa, M. y Recarey, C. (2012). *Técnicas de calibración numérica para problemas de ingeniería*. Ciudad de La Habana, Cuba: Departamento de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Ispjae) de La Habana, Centro de Investigación de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMCNI), de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- Álvarez, L. (1998). *La estabilidad de cortinas de presas de tierra mediante la solución de los estados tenso-deformacionales y la aplicación de la teoría de seguridad* (tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara.
- Álvarez, M. (2018). *Pronóstico de deformaciones en cortinas de presas de tierra* (tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Ispjae) de La Habana, Centro de Investigación de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería (Cimcni), Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, La Habana, Cuba.
- Álvarez, M., Álvarez, L. y Vázquez, R. (2017). Risk Assessment and Modeling of Technical Solutions for Filtrations Earth Dams. *Enfoque UTE*, 8(5), pp. 26 - 36. doi: 10.29019/enfoqueute.v8n5.177
- Blanco, E. E. E., Pacheco, C. E. Á. & Moreno, G. G. (2020). Modelamiento del tambor de una caldera acuo-tubular para una planta de energía térmica. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada (RCTA)*, 1(35). doi: 10.24054/16927257.v35.n35.2020.3924
- Box, G. y Jenkins, G. (1970). *Time Series Analysis Forecasting and Control*. Holden-Day.
- Box, G., Jenkins, G., Reinsel, G. y Ljung, G. (2015). *Time Series Analysis: Forecasting and Control* (5.º ed.). Wiley.
- Craig, R. (1997). *Soil Mechanics* (6.º ed.). CRC Press
- Delgado, P. (2011). *Sistema auscultación de obras subterráneas*. ACRE Surveying Solution.
- Feigl, K. L., Reinsch, E. C., Batzli, S. A. et al. (2020). Spatio-Temporal Analysis of Deformation at San Emidio Geothermal Field, Nevada, USA between 1992 and 2010. *Remote Sensing*, 11(16), 1935. doi: 10.3390/rs11161935
- Hernández, F. (2012). Asentamientos permanentes por sismo en presas de tierra y enrocamiento. *El posgrado en la Ingeniería Civil; II Encuentro*. <https://bit.ly/2H1kGqD>
- Jones, J. (1986a). Foundations and Earth Structures *Design Manual 7.02 (DM-7.02)*. Alexandria, Virginia, United States of America: Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC).
- Jones, J. (1986b). Soil Mechanics *Design Manual 7.01 (DM-7.01)*. Alexandria, Virginia, United States of America: Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC).
- Kopáček, A., Erdélyi, J. y Kyrinovič, P. (2020a). Design, Construction, and Operation of Nuclear Power Plants: Geodetic Activities. In A. Kopáček, J. Erdélyi, & P. Kyrinovič (Eds.), *Engineering Surveys for Industry* (pp. 197–213). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-48309-8_10
- Kopáček, A., Erdélyi, J. y Kyrinovič, P. (2020b). Setting-Out and Measurement of Cranes and Crane Runways. *Engineering Surveys for Industry* (pp. 143-178): Springer.
- Naranbat. (2009). *Nociones de Geología e Ingeniería Geológica para Ingenieros*. s.l.f.
- Quevedo, G. (2001a). Análisis de la estabilidad de taludes con la aplicación del método de las diferencias finitas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba: Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Facultad de Construcciones.
- Quevedo, G. (2001b). *Estudio de la estabilidad de taludes y laderas para la prevención de desastres*. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
- Recarey, C. (1999). *Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo* (tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Facultad de Construcciones, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.