

Revista de



TECNOLÓGICO

RIDTEC | Vol. 12, N.º 2, julio - diciembre 2016

ISSN 1680-8894

Edición Semestral

Publicación Regional



Volumen 12, Número 2, Edición Semestral, Enero - Diciembre
2016 ISSN 1680-8894

Director del Comité Editorial

Dra. Deyka García
Dirección de Investigación, UTP¹

Miembros

Dr. Humberto Álvarez
Centro de Investigación e Innovación Eléctrica,
Mecánica y de la Industria, UTP¹

Dr. Wedleys Tejedor
Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales, UTP¹

Dr. Carlos Medina
Facultad de Ingeniería Eléctrica, UTP¹

Dra. Jazmina Urriola
Dirección de Investigación y Desarrollo (I+D) SENACYT²

Ing. Elí Faskha
Miembro del CONEP³ y de la Junta Directiva de
CAPATEC⁴

Ing. Julío Mario Daza Escorda
Docente Investigador⁵ y Estudiante doctorando,
Universidad de Valencia, España

Suplentes

Dr. Ramfis Miguelena
Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Tecnologías
de la Información y las Comunicaciones, UTP¹

Afiliaciones

- 1 Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
- 2 Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), Panamá.
- 3 Consejo Nacional de la Empresa Privada (CONEP), Panamá.
- 4 Cámara Panameña de Tecnología y Comunicaciones (CAPACTE_q), Panamá
- 5 Politécnico de la Costa Atlántica, Colombia



Ing. Libia Batista
Directora

Licda. Sandra Siebert
Sr. Armando Pinillo
Mercadeo y Ventas

Sección de Diseño Gráfico
Diseño y diagramación

Licdo. Rafael Saturno
Idea y diseño original de la portada

Lcda. Klenya Morales
Corrección de estilo

Lic. Huriviades Calderón
Coordinación y logística
Dirección de Investigación, UTP.

Escribir en I+D Tecnológico

<http://utp.ac.pa/publicaciones-digitales-de-la-revista-de-id-tecnologico>

Plataforma para la Recepción de Artículos

<http://www.redinvestigadores.utp.ac.pa/revistaI+D/openconf/openconf.php>

© Derechos reservados, UTP

Impreso en Panamá, Ciudad de Panamá
Imprenta de la Universidad Tecnológica de Panamá
Tiraje: 300 ejemplares.

resentación

La Universidad Tecnológica de Panamá se complace en presentar a la comunidad científica en general la primera edición del año 2016 de la Revista I+D Tecnológico, correspondiente al volumen 12, número 2. En esta edición se han incluido trabajos en las áreas de cadena de suministros, Ingeniería de software, sistemas de información geográfica para analizar el comportamiento del ozono, entre otros.

En el primer artículo de este volumen, Pablo Moreno y Marcelo García de la Universidad Politécnica Salesiana, nos presentan una solución a la demanda de smart home, utilizando la metodología de respuesta a la demanda utilizando métodos estocásticos como Markov para poder optimizar el consumo de energía en los usuarios residenciales, demostrando así, que al optimizar el consumo energético se logra una menor emisión de CO₂ al medio ambiente al depender menos de centrales que utilizan combustibles fósiles.

Mientras que, Ariel Antonio Grey G. y Viccelda Domínguez de Franco de la Universidad Tecnológica de Panamá, estudio para caracterizar y analizar la presencia de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) en sedimentos en la Bahía de Manzanillo y determinar su influencia en los procesos de biodegradación. Recomendando, que el monitoreo de HAP en agua, sedimentos y en efluentes como una metodología adecuada para asegurar la calidad del entorno y así establecer parámetros de control y normativas para el monitoreo de las zonas costeras.

El trabajo presentado por Olmedo Hernández y Indira Franco, se enfoca en el Efecto sobre las propiedades reológicas y panificables de la enzima transglutaminasa en masas con almidón de yuca (*Manihot esculenta*), del cual se desarrolló además un análisis de perfil de textura (TPA) para medir variables como su fuerza y elasticidad. Los autores liderados por José Fábrega nos presentan los resultados de un trabajo de investigación cuyo objetivo fue el de analizar el comportamiento del ozono respecto

a la densidad de población, con base en las áreas de influencia. Los datos de ozono se presentan en concentraciones promedios mensuales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Se confeccionaron mapas de contaminación de ozono y de densidad de población para los años 2005, 2008 y 2010. Se encontró que las zonas con densidades de población alta tienen mayores niveles de contaminación por ozono.

Carlos Rovetto y colaboradores nos presentan una nueva subclase de Red de Petri especializada llamada Clase de red de Petri para usos de recursos binarios ordenados (BORPN) y sus principales propiedades estructurales, demostrando que una clase de red petri, proporciona ventajas que permiten el análisis de todo el comportamiento del sistema, siendo una tarea prohibitiva para grandes sistemas como los algoritmos de encaminamiento.

Por otro lado, los autores representados por Salvador Vargas, nos presentan un análisis, Síntesis y Aplicación de Circuitos Ópticos Birrefringentes Tipo FIR de Dos Puertos en Celosía con Cristales Líquidos,

Para finalizar, en el último artículo de esta edición, Vladimir Villarreal presenta un interesante aporte para la rehabilitación física de pacientes que requieren ejercicios de fisioterapia desde la comodidad de su hogar, previo análisis y recomendación del médico responsable. Consiste en una aplicación a través de un teléfono móvil que genera informes de los resultados de las actividades físicas realizadas tanto para el paciente como el médico. En el cual se analiza el comportamiento de la luz en un circuito con dos entradas y dos salidas en su recorrido a través de células de cristal líquido nemático con alineación homogénea. Finalmente se presenta un ejemplo de aplicación novedoso, en el área de las comunicaciones ópticas, donde se equaliza el espectro de emisión estimulada de un amplificador óptico de fibra dopada con Erbio.

DRA. DEYKA GARCÍA
Directora del Comité Editorial
Junio de 2016



Universidad Tecnológica de Panamá

AUTORIDADES

Dr. Oscar M. Ramírez R.
Rector

Ing. Rubén D. Espitia P.
Vicerrector Académico

Dra. Casilda Saavedra de Madrid
Vicerrectora de Investigación, Postgrado y Extensión

Ing. Esmeralda Hernández P.
Vicerrectora Administrativa

Ing. Luis A. Barahona G.
Secretaría General

Lic. Jeremías Herrera D.
Coordinador General de los Centros Regionales

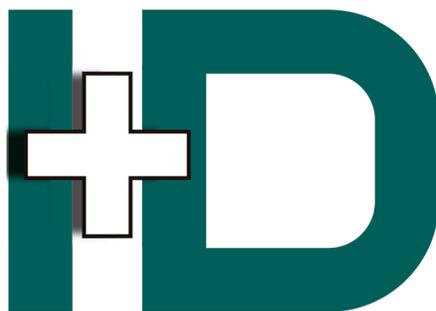
Contenido

- | | | | |
|-----------|---|-----------|---|
| 7 | Respuesta a la Demanda para Smart Home Utilizando Procesos Estocásticos
Power Scheduling Method for Demand Response based on Home Energy Management System using Stochastic Process
Pablo Moreno Marcelo García | 46 | Caracterización y Análisis de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en los sedimentos marinos de la Bahía Manzanillo y su influencia en los procesos de biodegradación
Characterization and analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments of manzanillo bay and influence biodegradation processes
Ariel Antonio Grey G. Vicelda Domínguez de Franco |
| 18 | Diseño de una plataforma logística para productos agrícolas en Panamá
Design of a logistic platform for agricultural products in Panamá
Humberto R. Álvarez Andrés Orozco Nuvia Martez José Manuel Castellón | 56 | Efecto sobre las propiedades reológicas y panificables de la enzima transglutaminasa en masas con almidón de yuca (Manihot esculenta)
Effect of transglutaminase on the reological and bakery properties of cassava (Manihot esculenta) dough
Olmedo Hernández Indira Franco |
| 26 | Un sistema de trazabilidad basado en web para la genética de ganado en Panamá
A web-based traceability system for cattle genetics in Panamá
Abner Caballero Vladimir Villarreal | 68 | Aproximación espacial de concentraciones de gases productos de fuentes móviles de la ciudad de Panamá, utilizando sistemas de información geográfica
Physical rehabilitation of patients: a mobile solution to facilitate basic physiotherapy exercises
María Singh José Fábrega |
| 36 | Mejorando la predicción del síndrome de Down mediante un modelo de clasificación de datos médicos inteligente- Caso de Estudio
Improving downs syndrome prediction with a smart medical data classification model- case of study
Juan Saldana-Barrios Tomas Concepción Miguel Vargas-Lombardo | | |

Revista indexada en:



www.latindex.unam.mx



Contenido

79

Optimización de una red para una casa inteligente basada en IEEE 802.15.4g para una infraestructura de medición avanzada

Optimizing a network for smart home based on IEEE 802.15.4g for advanced metering infrastructure

Darwin López V. | Wilson Pavón

106

Análisis, Síntesis y Aplicación de Circuitos Ópticos Birrefringentes Tipo FIR de Dos Puertos en Celosía con Cristales Líquidos

Analysis, synthesis and application of lattice two port fir type birefringent optical circuits with liquid crystals

Salvador Vargas | Jorge Rodríguez | Raymond Quintero | Luis Méndez | Miguel Hernández

89

Clase de red de Petri para usos de recursos binarios ordenados

Binary ordered resources petri net class

**Maricela Alexandra Arciniega Calderón
Carlos A. Rovetto | Tomás J. Concepción | Elia. E. Cano**

118

Generación y análisis de indicadores del uso de las TIC en PyMEs Agroindustriales

Generation and analysis of indicators of ICT in SMEs agroindustries

Lilia Muñoz | Píscis Pitti

98

Modelo de minería de texto aplicado a historiales clínicos electrónicos de pacientes de cuidados paliativos en Panamá

Text mining model applied to electronic medical records of palliative care patients in Panamá

Denis Cedeño-Moreno | Miguel Vargas-Lombardo

Revista indexada en:



www.latindex.unam.mx

Respuesta a la Demanda para Smart Home Utilizando Procesos Estocásticos

Power Scheduling Method for Demand Response based on Home Energy Management System using Stochastic Process

Pablo Moreno¹, Marcelo García^{1,2}

¹Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, ^{1,2}Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana
¹pmorenof@est.ups.edu.ec, ^{1,2}egarcia@ups.edu.ec

Resumen— El incremento del consumo de energía en los usuarios finales, en especial en los residenciales, implica que el sistema eléctrico crezca a la par, tanto en infraestructura como en potencia instalada, además los precios de la energía varían para poder satisfacer estas necesidades, por lo que el presente trabajo utiliza la metodología de respuesta a la demanda utilizando métodos estocásticos como Markov para poder optimizar el consumo de energía en los usuarios residenciales. Es necesaria la participación de los clientes en el sistema eléctrico, ya que de esta manera se logra verificar la cantidad de carga real que existe en la red en determinado tiempo, y esto ayuda a los sistemas eléctricos a ser más confiables y eficientes, dando garantías a la hora de dar un suministro energético. Además, al optimizar el consumo energético se logra una menor emisión de CO₂ al medio ambiente al depender menos de centrales que utilizan combustibles fósiles, lo cual implica una reducción en la contaminación global, un tema que es de primordial importancia en la actualidad. Aunque existen modelados para la optimización energética, la realidad es que el consumo de una vivienda es mucho más complejo, ya que tiene variables como la ubicación geográfica, la arquitectura, los materiales usados para el diseño, la disposición de las ventanas, el número de ocupantes, el clima, la estación del año. Entonces, al aplicar la respuesta a la demanda en entornos residenciales, es importante tomar en cuenta criterios básicos, como por ejemplo mantener el confort del usuario final ya que de esta manera se logra una participación sostenida de la respuesta de la demanda, al tener participación individual, se requeriría una gran inversión en tecnología de control y comunicación.

Palabras claves— Respuesta a la demanda, Automatización, Energía, Generación, Software, Servicio, Eficiencia, Residencial, Carga, Clientes.

Abstract— The increase in energy consumption, especially in residential consumers, means that the electrical system should grow at pair, in infrastructure and installed capacity, the energy prices vary to meet these needs, so this paper uses the methodology of demand response using stochastic methods such as Markov, to optimize energy consumption of residential users. It is necessary to involve customers in the electrical system because in this way it can be verified the actual amount of electric charge that exists on the network at a given time, and this helps electrical systems to become more reliable and efficient, providing security when an energy supply is given. In addition, to optimize energy consumption lower CO₂ emissions is achieved for the environment by relying less on plants using fossil fuels, which implies a reduction in global pollution, an issue that is very important today. Although there are models for energy optimization, the reality is that the consumption at home is much more complex because it has variables such as: geographical location, architecture, materials used for the design, arrangement of windows, number of occupants, weather, and season. Therefore, to apply the response to the demand in residential settings, it is important to take into account basic criteria, such as maintaining the comfort of the user and in this way a sustained participation of demand response, having individual participation, it would require a great investment in technology of control and communication.

Keywords— Demand response, Automation, Energy, Generation, Software, Service, Efficiency, Residential, Load, Customers.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 1 de febrero de 2016

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

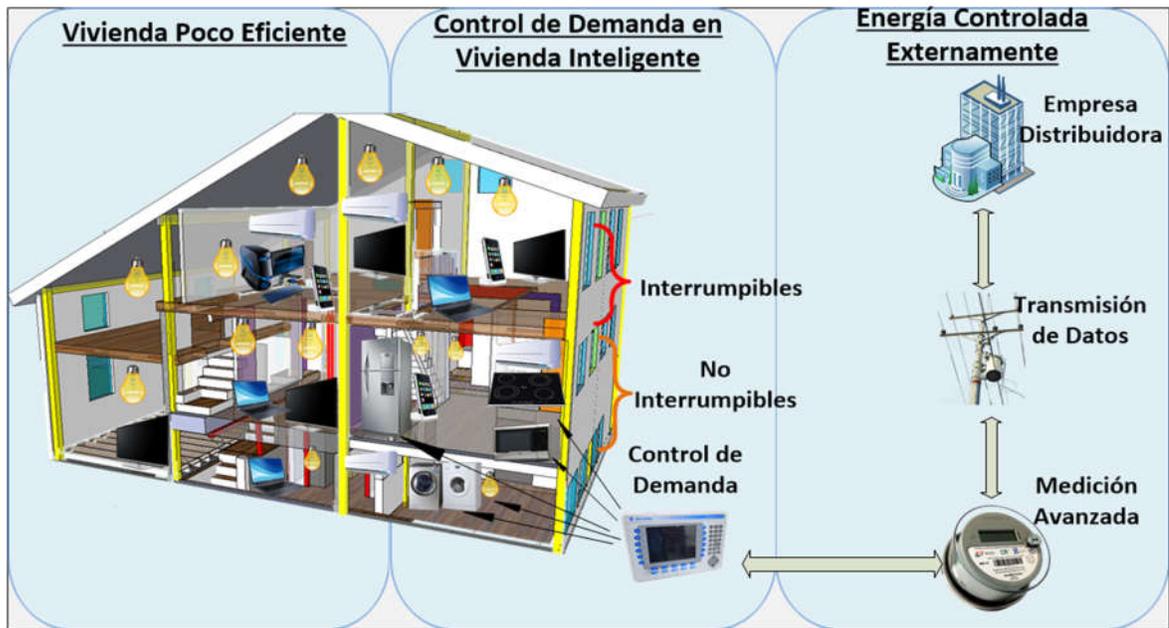


Figura 1. Optimización de una vivienda mediante respuesta a la demanda.

1. Introducción

Es muy importante poder optimizar el consumo energético mediante el uso de electrodomésticos eficientes, así se puede controlar la energía consumida y poder programar electrodomésticos para que funcionen en horarios en donde la energía eléctrica cuesta menos, además es necesario tener una red inteligente, es decir una infraestructura de medición avanzada o AMI por sus siglas en inglés[1]. En la figura 1 podemos observar una vivienda poco eficiente, ya que tiene muchos electrodomésticos conectados y funcionando al mismo tiempo, además de tener gran cantidad de iluminación, pero mediante la comunicación bidireccional es posible regular su consumo y hacerla más eficiente, implementando así, respuesta a la demanda.

Un requisito al momento de implementar respuesta a la demanda (RD), o por sus siglas en inglés DR, es usar electrodomésticos inteligentes y redes inteligentes.

La respuesta a la demanda se puede definir de varias formas. La primera puede ser el cambio del uso normal de energía de acuerdo a cambios de precio, también llamado precio sensible de la respuesta de la demanda. La segunda forma puede ser el pago de incentivos para reducir el consumo en momentos en que la energía es más costosa, y una tercera opción puede ser la reducción del consumo cuando se pone en peligro la

confiabilidad del sistema, es decir, respuesta a la demanda controlable[2][3].

En la actualidad es necesario tener una gran cantidad de generación subutilizada, y muchas veces obsoleta para así poder suplir los picos de demanda, y hacer que estos coincidan con la generación[4]. Esta capacidad extra muchas veces puede incluso ser dañina para el medio ambiente, e impulsa el incremento del precio de la electricidad, ya que muchas veces se ingresa, por ejemplo, generación térmica para poder suplir la necesidad energética en horas pico, u horas de mayor consumo[5][6][7].

El objetivo de la respuesta a la demanda es poder hacer a la demanda más flexible, en lugar de adaptar la generación a los cambios de demanda en ciertas horas. La ventaja de esto es poder reducir los requisitos de infraestructura de generación de energía eléctrica[7][8]. Un sistema que tenga respuesta a la demanda tiene como ventajas, aparte de la reducción de contaminación, el desplazamiento del consumo de energía a horarios caracterizados por bajos precios y alta producción de energías renovables[1][9].

Aunque los costos reales de generación, transmisión y distribución de energía pueden variar en el tiempo, los usuarios tienen tarifas basadas en promedios de la electricidad. Ya que los costos pueden variar por varias razones, estos pueden ser, la hora, o el mes, además por el tipo de generación utilizada en cierto período, por lo

general para suplir la demanda en horas pico es utilizada una generación térmica, lo cual es muy costoso debido al uso de combustibles fósiles[10][9].

La importancia de las redes inteligentes es que pueden ser auto-reparables en caso de fallas, se pueden incluir a los clientes en un envío de datos bidireccional, también deben tener resistencia a ataques que pueden venir desde el exterior mediante *software* malicioso. Además se puede ofrecer una gran calidad en la eficiencia del servicio[4][11][12].

Es muy necesaria la participación de los clientes en el sistema eléctrico, ya que de esta manera se logra verificar la cantidad de carga real que existe en la red en determinado tiempo, es decir, esto ayuda a los sistemas eléctricos a ser más confiables y eficientes, dando garantías a la hora de dar un suministro energético, ya que se evitaría, sobrecargas en ciertos sectores en horas pico, lo que puede desencadenar el corte de suministro energético hacia los usuarios[13][14][15]. El problema es lograr modelar de manera eficiente la demanda real en un determinado período, ya que la carga tiene un carácter estocástico, es decir, no se puede determinar su comportamiento real, tan solo se pueden realizar aproximaciones de acuerdo a datos obtenidos con anterioridad, por esta razón es necesaria en una red inteligente, la participación dinámica de los usuarios[16][17].

En el sistema de gestión de demanda residencial es necesaria la coordinación de un grupo de viviendas para gestionar simultáneamente la RD en toda una comunidad[3][4][11]. Muchas veces a los consumidores residenciales no se los considera de los programas de RD debido a su bajo consumo con relación a otros sectores, ya sean comerciales o industriales[18][19]. Una solución a esto puede ser usar un lazo cerrado con los clientes residenciales, es decir, tomar en cuenta un grupo grande de viviendas para monitorear su demanda, de esta manera el consumo energético en conjunto sería comparable a los consumos en sectores más grandes como los industriales y comerciales, y así poderlos incluir en los programas de RD[8][10][20].

Para tener una gestión inteligente de energía, se requieren cambios no solo en la forma de suministrarla sino también en cómo se maneja el mercado energético[9][14][21].

Entonces se puede decir que la respuesta a la demanda RD, se diseña para fomentar el consumo

energético cuando la energía renovable está disponible en respuesta al mercado energético, aplicando así, incentivos económicos[20][22].

Tabla 1. Variables

Q	Número de servidores.
q	Datos entrantes al servidor de respuesta a la demanda que están en cola.
Nq	Número total de AMIS conectados a un servidor.
S	Sensores de control de consumo en viviendas.
C_t^q	Señales de precio transmitidas a servidores.
As	Respuesta total de demanda.
LS	Valor máximo que se puede variar el consumo en un equipo eléctrico.
a_t^{qns}	Retroalimentación de datos.
λ_t^{qns}	Tasa de llegada de datos hacia los servidores.
t	Intervalo de tiempo.
$\rho_t^{qns}(k)$	Coefficiente de correlación entre dos acciones iguales en respuesta a la demanda.
k	Retardo de tiempo entre acciones de respuesta a la demanda.
ρ_t^{n1n2}	Coefficiente de correlación entre dos viviendas distintas.
n_1, n_n	Número de viviendas en un sistema con respuesta a la demanda.
Ωt	Estados de señales de tiempo.
$\pi_t^{qns}(\omega_t^{qns})$	Distribución en estado estacionario.

2. Respuesta a la demanda en el sector residencial

Las actividades de los usuarios residenciales pueden programarse por intervalos de tiempo preferidos por el cliente[6][23]. Algunas de estas tareas pueden ser no interrumpibles, como por ejemplo los frigoríficos, otras pueden ser interrumpibles, de acuerdo a la hora y al precio de la energía, por ejemplo televisores, equipos de sonido, ciertos tomacorrientes de acuerdo a la carga conectada, e iluminación[1][24].

Existen estudios sobre la respuesta a la demanda en el sector residencial, y se ha llegado a concluir que tan solo en los equipos de calefacción se tiene un 6% de la demanda total[2][20][22]. Como se había mencionado con anterioridad, la respuesta a la demanda requiere una

gran coordinación de un número predeterminado de hogares, esto es necesario para mejorar la fiabilidad y confiabilidad del sistema[3][4][10].

Al poder mover la demanda de horas pico hacia horas en donde existe menor precio y uso de energías renovables, como energía solar y eólica, aparte de dar un beneficio económico a los clientes, se reducirán las emisiones de CO₂ al ambiente debido a que ya no sería necesario utilizar centrales térmicas para abastecer la demanda, o se utilizaría una menor cantidad de ellas[25][26][27].

Para tener una comunicación bidireccional entre los consumidores y las empresas de distribución, es necesario implementar redes inteligentes AMI, y medidores inteligentes, para realizar mediciones inteligentes o *smart metering*[5][22][28][29].

Mediante AMI la empresa de distribución intercambia datos con los consumidores, y viceversa, razón por la cual el sistema de intercambio de información debe ser adecuada y sustentable a lo largo del tiempo[36]. En la figura 2 se observa la arquitectura de un AMI, en donde los usuarios están conectados entre sí y al proveedor, con una comunicación de dos vías.

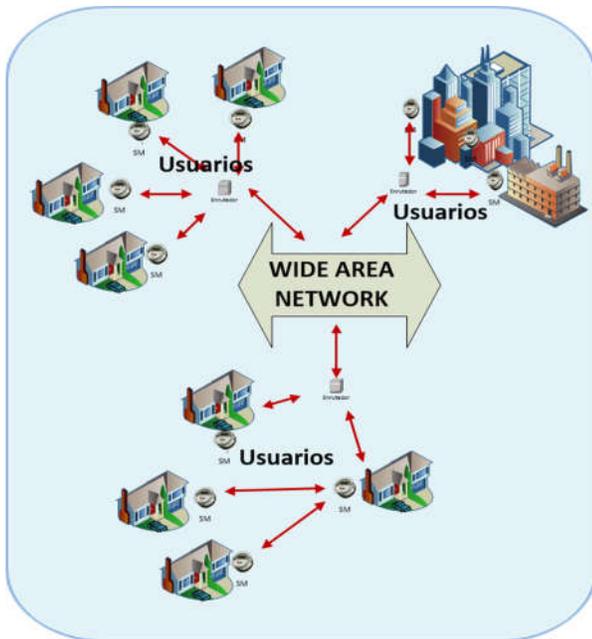


Figura 2. Arquitectura de infraestructura de medición avanzada.

El problema en este aspecto es lograr controlar la carga dentro de las viviendas, ya que no se puede cortar el suministro a un consumidor, por esta razón, se

necesita aparte de todo lo mencionado con anterioridad, una casa inteligente o un *Smart home*[30][31]. Una casa inteligente se refiere a una edificación equipada con inteligencia integrada, y una tecnología de telecomunicación, de tal forma que permita una respuesta a estímulos enviados desde el exterior de la misma[32][33]. También se tiene automatización en el hogar, de tal forma que se pueda gestionar el consumo de energía manteniendo los niveles adecuados de comodidad de los clientes[9][34]. En este aspecto, se toman en cuenta los tipos de carga utilizados en la vivienda, muchos de estos equipos deben estar en funcionamiento continuo, lo que significa que se requiere una cantidad de energía en un determinado período, pero también existen equipos a los que podremos reprogramar debido a su flexibilidad de uso en consumo energético, y de esta manera optimizar el consumo[11][22][35].

Para tener una comunicación a gran escala es necesaria la implementación de redes inteligentes o *Smart Grids*, lo que permitirá tener comunicación entre diversos puntos de la red, de esta manera, y mediante *software* especializado, la red podrá tomar decisiones automáticamente, de acuerdo a lo programado por el centro de control[37][38][39]. Otro punto importante al momento de implementar AMI, es que en paralelo a estos sistemas eléctricos debe haber elementos de *hardware*, *software* y telecomunicaciones, para así poder monitorear, controlar y administrar la red eléctrica, donde se pueden encontrar, controles automáticos de generación o AGC por sus siglas en inglés, *Energy Management System* EMS o sistema de gestión de energía. También se requieren sistemas como:

a) **Sistema de Información Geográfica (GIS):** Este es el punto de partida para implementar una red eléctrica usando AMI, ya que un GIS es un sistema que proporciona capacidades avanzadas de almacenamiento, manejo y despliegue de datos localizados geográficamente. Un GIS es un sistema o un conjunto de herramientas que relacionan diferentes componentes, esto permite organizar, manipular y analizar grandes cantidades de información para así poderla incorporar a varios procesos.

b) **Herramientas informáticas de una red eléctrica sobre un GIS:** Mediante estos sistemas podremos tener un sistema ágil y seguro, ya que obtiene todos los datos necesarios de una red eléctrica, ya sea tipo de

alimentadores, seccionadores, transformadores, equipos de medición, capacitores, restauradores, equipos de comunicación, entre otros. Es una base de datos con modelos estandarizados de elementos aplicables a un sistema eléctrico. También tiene un módulo para importar datos de un Sistema de Administración de la Distribución DMS. Mediante todas estas herramientas mencionadas anteriormente, se logra hacer respuesta a la demanda a los clientes que se encuentran dentro de los programas, a cambio de una compensación. Esto hará que la carga de la red en horario pico se alivie, evitando sobrecargas. La respuesta a la demanda se conseguirá variando cargas en las viviendas siempre y cuando no afecte la comodidad de los residentes, caso contrario muy pocos clientes querrán someterse a los planes de DR.

c) **Sistema de Control Supervisorio y Adquisición de datos (SCADA):** Mediante este sistema es posible obtener información en tiempo real de redes eléctricas, para así poder controlarlas y monitorearlas. Un sistema SCADA permite supervisar, controlar y adquirir datos, mediante un software instalado en ordenadores y así supervisar procesos a distancia.

d) **OMS *Outage Management System*:** Esta aplicación funciona sobre la estructura de un SCADA, y mediante esta se controlan todos los interruptores de la red de distribución, esto permite localizar que interruptor debe funcionar en caso de que haya fallas en el sistema, calcula un estimado del tiempo de interrupción entre otros.

e) **DMS *Distribution Management System*:** Es un sistema de administración de distribución eléctrica que visualiza el sistema en tiempo real y ayuda a controlarlo y monitorearlo al apoyarse en módulos para planeación, operación y optimización de estas redes.

f) **MDMS *Metering Data Management System*:** El MDMS es el corazón de un sistema AMI, este se ocupa de los datos que ingresan en la base de datos del centro de operaciones, para procesarlos y almacenarlos de manera adecuada. Esto hace que todos los datos se encuentren en la misma dirección, lo que facilita al momento de buscarlos y recuperar estos datos. El MDMS incluye diferentes herramientas de análisis, de esta manera se puede gestionar, interactuar y operar de manera óptima con los datos obtenidos. Sin embargo, MDMS tiene ciertos problemas de escalabilidad, como la comunicación de datos, procesamiento de datos, y el uso de recursos de comunicación.

g) **Comunicación de datos:** Con el incremento en la carga, la cantidad de información también se

incrementará, esto puede causar cuellos de botella en las zonas cercanas a la zona de congestión, esto podría provocar problemas ya que podría haber un retraso en la comunicación, y pérdida de datos.

h) **Procesamiento de datos:** Al incrementar la carga de información, no será posible para un solo MDMS, poder procesar toda la información

i) **Uso de recursos de comunicación:** La distancia entre el sistema MDMS centralizado y los concentradores de datos puede ser muy alta, y es necesario que toda la información de los medidores inteligentes viaje esta distancia hasta el sistema de gestión de datos, sin embargo, estos datos no son necesarios a diario para y por esta razón hay pérdidas en los recursos de comunicación importantes.

2.1 Arquitectura MDMS distribuida

En una arquitectura MDMS distribuida, cada MDMS recoge los datos de los concentradores bajo su territorio, para procesar estos datos y almacenarlos, en este caso el centro de operaciones requiere solo una fracción de la información obtenida. Esto ahorra una gran cantidad de ancho de banda, y al dividir el trabajo de un MDMS centralizado con los MDMS distribuido, la posibilidad de cuello de botella de los datos se elimina o se reduce.

Este sistema ayuda a la planeación y gestión de medidores inteligentes, mejora la medición del consumo del cliente, y da la posibilidad de la conexión y desconexión remota de usuarios[40][41][18].

En la figura 3 se puede ver un sistema MDMS distribuido, y como estos se conectan a un servidor principal.

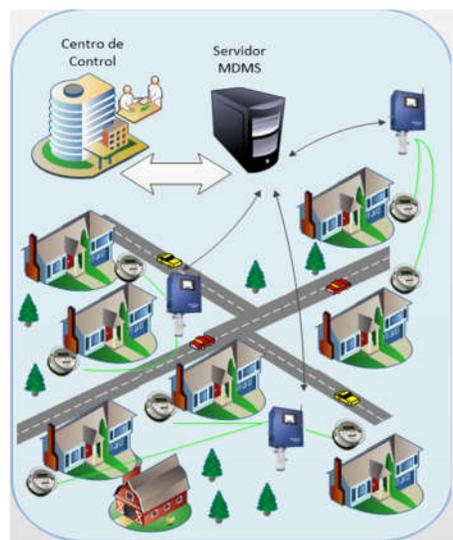


Figura 3. Arquitectura de MDMS distribuida.

Toda esta infraestructura es necesaria para el correcto funcionamiento de AMI, y es de primordial importancia que cada uno de estos elementos funcione correctamente ya que mediante estos sistemas, y al ser implementados en zonas rurales en el que el acceso puede resultar difícil, se podrá reducir drásticamente las pérdidas ya sea por falta de lecturas de medidores, o por robo de energía, y da una gran facilidad a las empresas distribuidoras de desconectar a los usuarios de zonas remotas ante la falta de pago.

Otro reto al desarrollar los sistemas de RD, es la dificultad al momento de modelar, y estimar el consumo energético de una vivienda en condiciones climáticas variables[17]. Aunque existen modelados para la optimización energética, la realidad es que el consumo de una vivienda es mucho más complejo, ya que tiene variables como la ubicación geográfica, la arquitectura, los materiales usados para el diseño, la disposición de las ventanas, el número de ocupantes, el clima, la estación del año[34][42].

Entonces, al aplicar la respuesta a la demanda en entornos residenciales, es importante tomar en cuenta criterios básicos, como por ejemplo mantener el confort del usuario final ya que de esta manera se logra una participación sostenida de la respuesta de la demanda, al tener participación individual, se requeriría una gran inversión en tecnología de control y comunicación[8][42][43].

2.2 Smart Home

Mediante un *Smart Home*, podrá controlar de manera óptima el consumo energético y el consumo de electrodomésticos[18][44][8].

El objetivo de una vivienda inteligente es proporcionar el mayor confort a sus usuarios, proporcionando una mejor calidad de vida, mejorando también la seguridad consiguiendo un mayor número de servicios para sus ocupantes.

El objetivo de un *Smart Home* es que los usuarios puedan controlar la vivienda, también poder controlar todos los electrodomésticos desde un sistema de control, esto también ayudaría a verificar el consumo energético y la potencia consumida por los mismos, y así poderlos controlar de manera más eficiente.

Para poder integrar todos estos componentes se necesita una red avanzada inteligente AMI por sus siglas en inglés.

2.3 Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)

El primer inicio en los procesos de automatización del suministro eléctrico fue conocido como AMR, advertía una evolución respecto del contador tradicional analógico a un equipo digital; esta etapa ha comprendido únicamente un proceso de lectura automática del contador eléctrico y evitaba el acceso del personal de lectura de las empresas de distribución; situación social que ha sido comentado en algunos temas relacionados con el impacto laboral con sistemas autómatas. En el proceso e intento de lectura automática del consumo eléctrico se incrementó la necesidad de realizar un proceso de corte y reconexión del suministro eléctrico, pero ya para esta opción se requeriría la inclusión de una tecnología de comunicación bidireccional que provoque el control desde las empresas de distribución sobre el consumidor.

Al disponer de una comunicación en una vía para una lectura automática del suministro se podía añadir la detección de manipulación y los perfiles de carga, pasando previamente por una etapa con una lectura de la demanda diaria, intervalos de horario diarios, notificación de corte, hasta llegar finalmente a integrar un servicio para cortes y reconexiones, con lecturas en determinado tiempo y velocidad, bajo parámetros de consumo en horas pico, programación remota del contador, calidad de energía, interfaz para *HAN –Home Area Network* y la posibilidad de incluir usuarios prepago. En AMI se requiere que la etapa de medición inteligente (*Smart Metering*), se encargue de la recolección de datos de un número considerable de medidores inteligentes (*Smart Meters*), y encuestados bajo cierto intervalos y por un determinado tiempo; así, de acuerdo a proyectos emblemáticos y casos de estudio como los presentados por Oncor-Texas/USA[16] se advierte que se requeriría de una frecuencia de 15 minutos para leer cada *smart meter* [17] a través de Sistemas de Gestión de Datos de Medición (MDMS); estos MDMS serán los encargados de almacenar la información en los centros de control de las empresas de distribución.

3. Formulación del problema

Como se mencionó, para poder realizar respuesta a la demanda, se necesita tener una comunicación bidireccional entre la empresa y los clientes, esto para poder enviar los datos de los precios en tiempo real,

distribuidos mediante un sistema de medición avanzada AMI.

Cada subestación está representada mediante servidores, en donde entran las señales de respuesta a la demanda, formando colas en los servidores, lo cual puede representar una pérdida de información debido a los límites de capacidad. Si llamamos Q al número de servidores, es decir al número de colas de datos en la red. Para cada cola de datos representado mediante q en $\{1, \dots, Q\}$, se tiene N_q como el total de AMIs conectados al servidor q . Para poder censar los electrodomésticos en una vivienda, se debe suponer que en cada AMI de los hogares se encuentran sensores S , con cada sensor $s=1, \dots, S$, de esta manera se vigila los aparatos con consumos considerables de electricidad y poder controlarlos en caso de necesitar respuesta a la demanda, por ejemplo electrodomésticos como, secadoras de ropa, equipos de aire acondicionado, refrigeradoras, entre otros.

Para poder optimizar el consumo se deben tomar diferentes períodos en donde la señal del precio C_t^q se transmitirá hacia los servidores q , los cuales se encuentran por toda la red AMI. Una vez enviados a estos precios los consumidores cambiarán su consumo dando lugar así a una respuesta a la demanda basado en los precios enviados en ese momento $A_s = \{-L_s, \dots, -1, 0, 1, \dots, L_s\}$, este proceso se repetirá en cada sensor s , así, L_s representa el valor máximo en que la carga puede variar en el sensor s , 0 significa que no existe ningún cambio en el estado de funcionamiento de los electrodomésticos, y el signo negativo es lo que se quiere lograr, ya que representa una disminución en el consumo energético de los electrodomésticos censados. Para representar en el sistema la realimentación se usa $a_t^{qns} \in A_s$ y λ_t^{qns} , y la tasa de llegada hacia los servidores enviados desde el sensor s en el hogar n , en un intervalo de tiempo t . El coeficiente de correlación entre dos acciones iguales en respuesta a la demanda se define como, $\rho_t^{qns}(k)$, pero con retardos de tiempo k entre las acciones. El coeficiente de correlación entre dos viviendas distintas n_1 y n_2 que se encuentran en el mismo servidor se define como $\rho_t^{n_1 n_2}$. Se puede considerar que el costo de producción y las señales de precio pueden estar correlacionadas entre sí, aunque se encuentren en diferentes servidores. Las señales de

respuesta a la demanda de las colas q_1 y q_2 también pueden tener correlación mediante el coeficiente $\rho_t^{q_1 q_2}$.

De esta manera se puede ver cómo se puede distribuir señales de manera bidireccional en un nivel superior, sin embargo, se debe entender como es el comportamiento de los clientes.

3.1 Modelo de Cadenas de Markov para respuesta a la demanda de los consumidores

Se toman en cuenta dos tipos de comportamientos para esta sección, el primer tipo de comportamiento demuestra poca elasticidad hacia las señales de incentivos exteriores, pero es más sensible a la hora del día, es decir tiene un comportamiento específico en ciertas horas a lo largo de días similares, un ejemplo de esto es la iluminación que en días similares su comportamiento será igual, y por esta razón el incentivo externo no tendrá efecto en este apartado en específico, o será casi despreciable, al menos cuando la variación de precios es moderada.

Como se puede ver este tipo de comportamiento a largo plazo es estable, por esta razón se puede establecer una cadena de Markov que tenga solo dos estados, en cada tiempo t para un número determinado de días. En este caso el estado de tiempo Ω_t tiene dos estados, un inelástico representado por 0 y un estado elástico representado por 1, de tal forma que, $\Omega_t = \{0, 1\}$. La naturaleza estable de este tipo de comportamiento se modela mediante la distribución en estado estacionario $\pi_t^{qns}(\omega_t^{qns})$.

Lo siguiente que se debe hacer es modelar la respuesta dinámica de la demanda a la variación del precio de la electricidad sobre la hora del día, aquí se introduce otra cadena de Markov, en donde su estado se compone de la elasticidad, esta puede ser elástica o inelástica y también del precio de la electricidad u otros factores, de esta forma se modela el comportamiento dinámico de respuesta a la demanda mediante las probabilidades de transición de la siguiente forma:

$$P(\omega_{t+1}^{qns} = i | \omega_t^{qns} = j, c_t^q, c_{t+1}^q), \forall i, j \in \Omega_t \quad (1)$$

Se debe tomar en cuenta que para que haya una mayor probabilidad de transición se debe escribir entre (ω_t^{qns}, c_t^q) y $(\omega_{t+1}^{qns}, c_{t+1}^q)$. Sin embargo, lo que se quiere es la dependencia probabilística del siguiente estado de elasticidad, con relación al estado anterior en

base a la elasticidad del período actual y el precio, la ecuación 1 es la cantidad a estimar.

Se relacionan las dos cadenas de Markov mediante la ecuación: Para $i, j \in \{0,1\}$

$$= \sum_{j \in \Omega_t, c_t^q \in C_t^q} \pi_{t+1}^{qns}(\omega_{t+1}^{qns}=i) P(\omega_{t+1}^{qns} = i | \omega_t^{qns} = j, c_t^q, c_{t+1}^q) x P(c_t^q) \quad (2)$$

$$P(c_{t+1}^q) \pi_t^{qns}(\omega_t^{qns} = j)$$

En este caso se asume que el proceso de precio es independiente a la elasticidad del consumidor, esto debido a que el impacto de un solo usuario en el sistema es mínimo en relación a la dinámica del mercado.

Como se mencionó anteriormente, para las Cadenas de Markov, se utilizan dos tipos de datos, uno relacionado el tiempo del día $t, t+1, t+2$, y otro en relación a los días similares. La primera cadena de Markov utiliza los días similares, modelando de esta forma el comportamiento del consumo mediante los componentes de estado estable a largo plazo, aquí se utiliza la ecuación 1.

La segunda cadena de Markov ya toma en cuenta también el tiempo del día, es decir relaciona el tiempo del día con los días iguales, y para representar estas dos dimensiones se utiliza la ecuación 2.

Generando el pseudocódigo de cadenas de Markov para este problema queda de la siguiente manera:

ALGORITMO

Algoritmo de Cadenas de Markov

```

Algoritmo Markov
Inicializo  $\omega$  y  $c$ 
Inicializo  $Q(1 : Ls, 1 : Nq) = 0$ 
Inicializo  $P(1 : Ls, 1 : Nq) = 1/M$ 
Inicializo  $A(l_s) = 1$  para todo  $l=1:L$ 
for todo intervalo  $i \in I$ 
  for  $n = 1:N$ 
    for  $l=1:L$ 
      Selecciona  $a'$  basado en  $P$ 
      Calculo usando (1)
      Encuentra  $a^*$  usando (2)
      Actualiza  $Q_n(s_l, a)$  usando (1)
      Actualiza  $P_n(s_l, a)$  usando (2)
    end for
  Guarda  $P(s, a)$  y  $Q(s, a)$  para todos los valores de  $s$  y  $a$ .
end for
end for
    
```

En el algoritmo debemos inicializar los valores del número de servidores utilizados, además es necesario especificar para cada estado todas las probabilidades condicionales desde el valor uno a L_s el cual representa el valor máximo de carga que puede variar un equipo eléctrico, y se inicializa A que es el cambio en la demanda de los usuarios. Tanto para el número de servidores como para la probabilidad se debe especificar el número de AMIs que se tienen en el sistema. N es el número de estados en donde la probabilidad va variando en cada uno de ellos. Una vez que se realiza esto, se comienza a realizar las iteraciones en donde se irá encontrando el valor de a que es el consumo de los usuarios, y s que es el sensor en donde se ha realizado el cambio del consumo, estos valores se almacenan en P y Q para así obtener el resultado más óptimo.

4. Simulación y Resultados

Al tener los incentivos de precio, la demanda variará su comportamiento de acuerdo a la hora del día y el precio energético en un momento determinado, es decir se dejarán de utilizar los electrodomésticos que hayan sido considerados como no indispensables o se reducirá su consumo de acuerdo a lo diseñado, ya que como se mencionó anteriormente habrá equipos que puedan llegar a una potencia mínima.

En la figura 4 se puede ver la curva de demanda diaria antes de realizar el control con respuesta a la demanda.

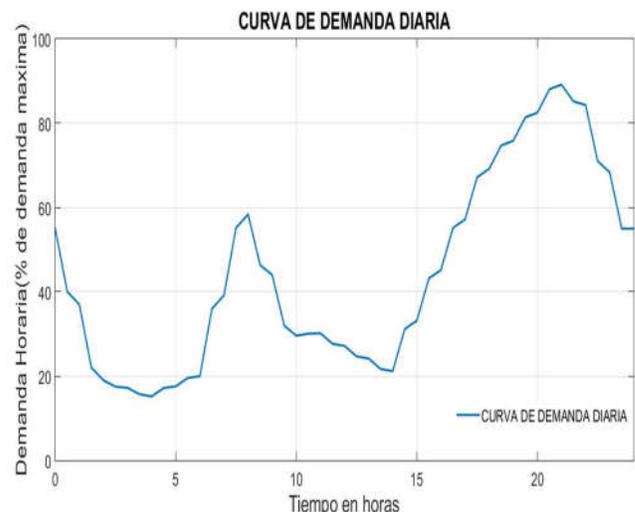


Figura 4. Curva de la demanda diaria.

Para el ejemplo se han tomado 4 casos diferentes de estudio, el primer caso con cincuenta usuarios, el segundo caso con 150 usuarios, el tercer caso con 250

usuarios y el cuarto caso con 500. Podemos verificar que el comportamiento es diferente dependiendo del número de usuarios.

En la figura 5 podemos verificar que de acuerdo al costo de la energía variará el consumo energético de un vecindario, se tiene con línea punteada el comportamiento original, y con línea continua el comportamiento de la demanda una vez optimizado.

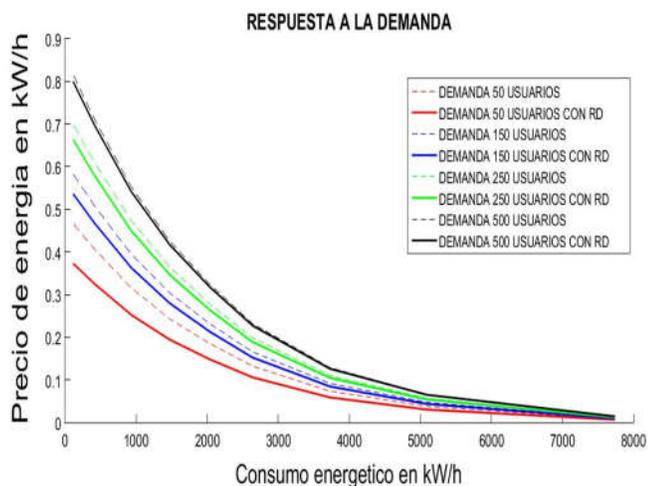


Figura 5. Respuesta del consumo eléctrico con relación al precio.

Podemos ver que a medida que el precio disminuye el consumo energético de un electrodoméstico aumentará hasta su máximo posible.

De esta forma el consumo energético general se verá optimizado ya que se realizará la respuesta a la demanda, y así en períodos de hora pico lo que se modificará será la demanda y no se aumentará la generación.

En cada caso se puede apreciar un comportamiento diferente en el consumo energético, la optimización variará de un grupo de usuarios a otro, en el caso de cincuenta usuarios se logró una optimización del 20%, para el caso de 150 usuarios se logró una optimización del 8%, para el tercer caso con 250 usuarios se logró una optimización del 5%, y para el último caso con 500 usuarios se logró una optimización del 2%.

En la figura 6 se puede ver como se modifica la curva de demanda diaria, llegando a un punto de optimización de tal manera que no afecte al usuario.

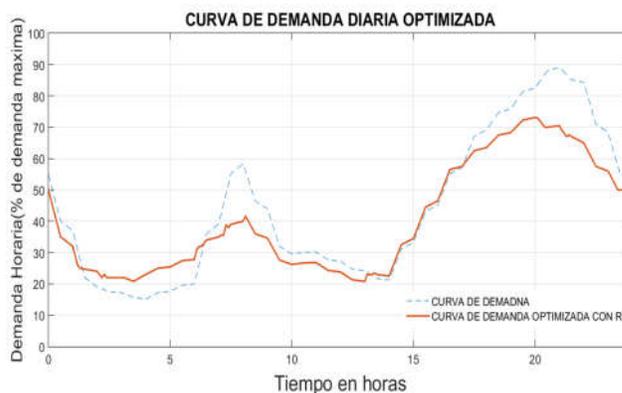


Figura 6. Cambio de curva diaria optimizada.

Como podemos verificar en la gráfica, eleva el consumo de ciertos equipos en determinadas horas de acuerdo al precio que haya sido establecido en cierto momento, pero al final la curva es optimizada de tal forma que el consumo en general se ve reducido, sobre todo en el horario de la tarde, de esta manera podemos establecer que la regulación de la demanda se ha efectuado de manera óptima, se obtuvo un valor medio de 44.17 en el caso de la curva sin optimización, y un valor medio de 40.38 en la curva optimizada, lo que nos da un ahorro energético del 9% al utilizar la optimización mediante respuesta a la demanda.

Como ventaja al usar este modelo de Markov, es que se combina el comportamiento de los ocupantes y modelos de cargas residenciales, tomando en cuenta también datos ambientales, para así producir las predicciones de demanda residencial con un determinado período. En los estudios de RD por lo general no se toma en cuenta el comportamiento de los usuarios y sus necesidades, sin embargo estas no pueden ser subestimadas, mediante estos modelos matemáticos los investigadores pueden predecir mejor como los ocupantes de las viviendas interactúan en grandes cargas residenciales, también pueden ayudar de mejor manera a los planificadores e investigadores a decidir cuál es el mejor incentivo para los clientes en los programas de respuesta a la demanda para tener un mayor impacto.

5. Conclusiones

Realizar respuesta a la demanda es necesario, ya que de esta manera se minimizarán las inversiones en construcción de centrales para abastecer la demanda pico, así se logrará reducir el consumo energético en estos períodos, y lo que se busca es poder mover estos consumos a diferentes horarios, esto es de gran ventaja

tanto para usuarios como para empresas distribuidoras. Para los usuarios debido a que tendrán un consumo más optimizado, esto debido al control externo realizado, lo cual se traducirá en ahorros económicos debido a los incentivos proporcionados. Y para las empresas distribuidoras es ventajoso, ya que podrán implementar sistemas más seguros y confiables, reduciendo las grandes inversiones en generadoras eléctricas y líneas de transmisión.

Sin embargo, aún es muy complicado poder implementar este método, debido a que se deben implementar redes AMI y medidores inteligentes a todas las viviendas, ya que sólo mediante una comunicación bidireccional se logrará hacer este control, de esta manera se pueden tener las estimaciones de consumo de los usuarios.

Se puede verificar que, al aplicar respuesta a la demanda, el consumo bajará en ciertas horas, y subirá en momentos más oportunos debido al tipo de generación utilizada, ya que, al utilizar generación renovable, la contaminación también se reducirá, lo cual es algo que preocupa a nivel mundial.

Se puede ver en las figuras las variaciones de consumo que existen, al controlar electrodomésticos que no son muy importantes como por ejemplo televisores, equipos de sonido, consolas de videojuegos, y manteniendo encendidos equipos que son básicos para la comodidad del usuario como por ejemplo refrigeradoras, equipos de calefacción para la vivienda o calentadores de agua.

Como podemos ver si bien es cierto que es de gran ventaja, aún falta muchos pasos a implementar en un sistema eléctrico para poderlo aplicar a gran escala, sin embargo al hacerlo sus beneficios superarán cualquier costo de inversión, ya que incluso el medioambiente se verá menos afectado, ya que no será necesaria la construcción de más centrales de generación, en la misma proporción a las que se hace hoy en día, la economía de los usuarios será cuidada y la eficiencia y confiabilidad de los sistemas eléctricos aumentará.

6. Referencias

- [1] S. Li and D. Zhang, "Developing smart and real-time demand response mechanism for residential energy consumers," in *2014 Clemson University Power Systems Conference*, 2014, pp. 1–5.
- [2] M. Muratori and G. Rizzoni, "Residential Demand Response: Dynamic Energy Management and Time-Varying Electricity Pricing," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–10, 2015.
- [3] N. Neyestani, M. Y. Damavandi, M. Shafie-khah, J. P. S. Catalao, and G. Chicco, "Uncertainty characterization of carrier-based demand response in smart multi-energy systems," in *2015*

IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2015, pp. 366–371.

[4] Y. Ozturk, P. Jha, S. Kumar, and G. Lee, "A personalized home energy management system for residential demand response," in *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2013, pp. 1241–1246.

[5] W. Shi, N. Li, X. Xie, C.-C. Chu, and R. Gadh, "Optimal Residential Demand Response in Distribution Networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 7, pp. 1441–1450, Jul. 2014.

[6] D. Han and J. Lim, "Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and zigbee," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 1403–1410, Aug. 2010.

[7] S. Ghaemi and S. Schneider, "Potential analysis of residential Demand Response using GridLAB-D," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013, pp. 8039–8045.

[8] V. Zois, M. Frincu, and V. Prasanna, "Integrated platform for automated sustainable demand response in smart grids," in *2014 IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IWIES)*, 2014, pp. 64–69.

[9] S. H. Hong, Y.-C. Li, J. H. Park, and B. Zhao, "Experimental implementation of demand response service for residential buildings," in *2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2014, pp. 277–282.

[10] P. M. Purohit and H. S. Pandya, "Demand Response Program for consumer interactive distribution system," in *2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*, 2015, pp. 1–5.

[11] Li Zhang, Jianguo Zhao, Xueshan Han, and Lin Niu, "Day-ahead Generation Scheduling with Demand Response," in *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, 2005, pp. 1–4.

[12] P. B. Luh, L. D. Michel, and P. Friedland, "Load forecasting and demand response," in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 1–3.

[13] S. Annala, S. Viljainen, and J. Tuunanen, "Demand response from residential customers' perspective," in *2012 9th International Conference on the European Energy Market*, 2012, pp. 1–7.

[14] W. Jewell, "The Effects of Residential Energy Efficiency on Electric Demand Response Programs," in *2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2014, pp. 2363–2372.

[15] N. Baghina, I. Lampropoulos, B. Asare-Bediako, W. L. Kling, and P. F. Ribeiro, "Predictive control of a domestic freezer for real-time demand response applications," in *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 2012, pp. 1–8.

[16] M. Kim, J. Choi, and J. Yoon, "Development of the Big Data Management System on National Virtual Power Plant," in *2015 10th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC)*, 2015, pp. 100–107.

[17] Z. Wang and R. Paranjape, "Agent-based simulation of home energy management system in residential demand response," in *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2014, pp. 1–6.

- [18] Z. Wang, R. Paranjape, A. Sadanand, and Z. Chen, "Residential demand response: An overview of recent simulation and modeling applications," in *2013 26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2013, pp. 1–6.
- [19] C.-S. Choi, J. Han, W.-K. Park, Y.-K. Jeong, and I.-W. Lee, "Proactive energy management system architecture interworking with Smart Grid," in *2011 IEEE 15th International Symposium on Consumer Electronics (ISCE)*, 2011, pp. 621–624.
- [20] M. R. Narimani, J.-Y. Joo, and M. L. Crow, "The effect of demand response on distribution system operation," in *2015 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, 2015, pp. 1–6.
- [21] V. J. Martínez and H. Rudnick, "Design of Demand Response programs in emerging countries," in *2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2012, pp. 1–6.
- [22] L. Gkatzikis, I. Koutsopoulos, and T. Salonidis, "The Role of Aggregators in Smart Grid Demand Response Markets," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 7, pp. 1247–1257, Jul. 2013.
- [23] L. Jidong, Z. Zehui, Z. Li, and H. Xueshan, "Evaluating short term benefits of demand response," in *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2011, pp. 1211–1215.
- [24] H. Johal, K. Anaparthi, and J. Black, "Demand response as a strategy to support grid operation in different time scales," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 1461–1467.
- [25] M. Muratori and G. Rizzoni, "Residential Demand Response: Dynamic Energy Management and Time-Varying Electricity Pricing," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 1108–1117, Mar. 2016.
- [26] Y. Ozturk, P. Jha, S. Kumar, and G. Lee, "A personalized home energy management system for residential demand response," in *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2013, pp. 1241–1246.
- [27] Hyung-Geun Kwag and Jin-O Kim, "Modeling demand resources for ISO's demand response scheduling," in *2011 IEEE Trondheim PowerTech*, 2011, pp. 1–6.
- [28] S. A. Raziei and H. Mohscnian-Had, "Optimal demand response capacity of automatic lighting control," in *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2013, pp. 1–6.
- [29] A. Safdarian, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Lehtonen, "A Distributed Algorithm for Managing Residential Demand Response in Smart Grids," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2385–2393, Nov. 2014.
- [30] P. M. Purohit and H. S. Pandya, "Demand Response Program for consumer interactive distribution system," in *2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*, 2015, pp. 1–5.
- [31] Q. Zhou, W. Guan, and W. Sun, "Impact of demand response contracts on load forecasting in a smart grid environment," in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1–4.
- [32] M. Strobbe, K. Vanthournout, T. Verschuere, W. Cardinaels, and C. Develder, "Large-scale residential demand response ICT architecture," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, 2014, pp. 1–6.
- [33] Z. Wang, R. Paranjape, A. Sadanand, and Z. Chen, "Residential demand response: An overview of recent simulation and modeling applications," in *2013 26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2013, pp. 1–6.
- [34] B. Dupont, J. Tant, and R. Belmans, "Automated residential demand response based on dynamic pricing," in *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 2012, pp. 1–7.
- [35] F. Y. Xu, X. Wang, L. L. Lai, and C. S. Lai, "Agent-Based Modeling and Neural Network for Residential Customer Demand Response," in *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2013, pp. 1312–1316.
- [36] E. Inga and R. Hincapié, "Optimal Deployment of Cellular Networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid," *Commun. Comput. (COLCOM), 2014 IEEE Colomb. Conf.*, 2014.
- [37] P. Ravindran, K. R. Das, and A. S. Mohan, "Flexible demand response in smart grid based Automatic Generation Control," in *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, 2014, pp. 1–6.
- [38] A. Sinha, S. Neogi, R. N. Lahiri, S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and N. Chakraborty, "Smart grid initiative for power distribution utility in India," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1–8.
- [39] M. H. Albadi and E. F. El-Saadany, "Demand Response in Electricity Markets: An Overview," in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1–5.
- [40] N. H. Tran, C. T. Do, S. Ren, Z. Han, and C. S. Hong, "Incentive Mechanisms for Economic and Emergency Demand Responses of Colocation Datacenters," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 12, pp. 2892–2905, Dec. 2015.
- [41] J. C. Van Gorp, "Maximizing energy savings with enterprise energy management systems," in *Conference Record of 2004 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (IEEE Cat. No. 04CH37523)*, 2004, pp. 175–181.
- [42] Z. Zhao, G. Verbic, and F. Fiorito, "Model analysis of a residential building for demand response," in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.
- [43] M. H. Javidi, "An efficient home energy management system for automated residential demand response," in *2013 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2013, pp. 307–312.
- [44] N. Yu, T. Wei, and Q. Zhu, "From passive demand response to proactive demand participation," in *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2015, pp. 1300–1306.

Diseño de una plataforma logística para productos agrícolas en Panamá

Design of a logistic platform for agricultural products in Panama

Humberto R. Álvarez^{1,3}, Andrés Orozco², Nuvia Martez³, José Manuel Castellón¹

¹Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Panamá, ²Universidad Marítima Internacional de Panamá, ³Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria

humberto.alvarez@utp.ac.pa, aorozco@umip.ac.pa, nuvia.martez@utp.ac.pa, josemanuelcastrellon@yahoo.com

Resumen– Uno de los mayores retos del sector agrícola es el de fortalecer los eslabones más débiles de la cadena agrícola. El objetivo de este proyecto, financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá, fue el modelar matemáticamente, por primera vez, la cadena de suministros de productos agrícolas, y proponer políticas para una plataforma logística que optimice la distribución de estos productos en el país. Específicamente, se modeló la cadena de distribución de la lechuga, donde se desarrolló un modelo matemático que permitió proponer decisiones con respecto al volumen de lechuga a mover a los diferentes mercados y del tipo de vehículo utilizado. Se realizó un análisis de costos para entender las implicaciones para los diferentes elementos de la cadena de suministros. Finalmente, se presenta una propuesta para centros de distribución en función a diferentes escenarios.

Palabras claves– Plataforma logística, modelo matemático, optimización, cadena de suministros agrícola, centros de distribución.

Abstract– One of the main challenges of the agricultural sector in Panama is to fortify the weak links that can be found in the agricultural supply chain. The objective of this project, funded by the National Secretariat of Science, Technology and Innovation of Panama, was to model, for the first time, the supply chain of agricultural products, and to design and propose the corresponding policies for the logistic platform that would optimize distribution of agricultural products in the country. Specifically lettuce was used as the main product for the analysis, and an optimization model was developed in order to propose decisions, not only with respect to volume distributed to the different markets, but also with respect of the type of vehicle used. A cost analysis was performed in order to study the implications for the different elements of the supply chain. Finally, a decision for a new distribution center was made for different scenarios.

Keywords– Logistic platform, mathematical model, optimization, agricultural supply chain, distribution centers.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 4 de marzo de 2016

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

1. Introducción

Panamá ha sido siempre un punto central en la logística y transporte en el continente americano. Proyectos tales como la expansión del Canal de Panamá, la Zona Económica Especial Panamá Pacífico, la Zona Libre de Colón, el Aeropuerto de Tocumen, los puertos panameños y otros más, son una muestra de esto.

Por otro lado, hay una falta de estudios formales sobre la logística interna del país, en especial del sector

agrícola. Según la Contraloría General de la República [1] la agricultura y otras actividades conexas son las principales fuentes de empleo en las zonas rurales del país. Este sector representa cerca del 20% del total de la mano de obra empleada, pero sólo el 3% del PIB. La falta de modelos de análisis y optimización de la cadena agrícola interna puede ser una de las razones por la que no se puede entender claramente el origen de este problema.

El objetivo de este trabajo es el de presentar un modelo matemático que represente tanto el comportamiento de la cadena de suministro agrícola, como ser una herramienta de análisis y toma de decisiones que apoye el desarrollo de políticas de transporte a través de la optimización en el uso de diferentes medios terrestres de transporte.

El modelo presentado es el principal resultado de un proyecto de investigación financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Panamá [2], [3], [4] que tuvo como objetivo el estudio de la red de distribución interna de los productos agrícolas y presentar escenarios que permitieran decidir sobre la ubicación óptima de una o varias plataformas logísticas (“hubs”) que permitan la distribución a menor costo de los diferentes productos en el mercado panameño. El resto de este documento presenta una breve revisión del estado del arte en este tema, la metodología utilizada y alguno de los principales resultados obtenidos.

2. Revisión de literatura

Boudahri [5] define el término cadenas de suministro agroalimentario (CSA) para describir las actividades desde la producción hasta la distribución final de productos agrícolas u hortícolas. Dichas cadenas están formadas por los agricultores, distribuidores, procesadores, comercializadores y consumidores finales de productos agrícolas.

El estudio de los sistemas de distribución de alimentos se convierte en un punto importante en la gestión de la cadena de suministro agroalimentario por varias razones. En primer lugar, la escasez de alimentos se vuelve crítica hoy en día debido al cambio climático. Por ejemplo, debido a la sequía que actualmente se sufre en los Estados Unidos y Rusia, o constantes inundaciones en Colombia, México, América Central y Europa Central y del Sur, los rendimientos en los cultivos y del ganado están disminuyendo. Por lo tanto, el costo de los alimentos está aumentando.

La logística agrícola es de interés [6] ya que las personas necesitan alimentos accesibles y seguros, en términos de disponibilidad, los efectos en la salud y los costos, convirtiéndose en una cuestión estratégica para los gobiernos. Así, aspectos como la conectividad y transporte de productos se convierten en elementos prioritarios para la CSA. Adicionalmente, el tema es de interés para investigadores y académicos [7], ya que se

busca optimizar la ubicación y diseño de centros de distribución a fin de optimizar la distribución de alimentos, en especial en cuanto a costos.

La distribución de productos agrícolas entre diferentes puntos implica considerar aspectos relacionados con la vida de los productos agrícolas, la complejidad de las cadenas logísticas, la existencia de diferentes operadores de transporte, la necesidad de mantener la cadena de frío a fin de mantener la integridad, inocuidad y calidad de los productos [5] [8] el estudio de las redes de distribución, a fin de abordar los diferentes problemas existentes entre los diferentes componentes de la cadena de suministros, entre ellos los sistemas de transporte y distribución [7], considerando que las redes de distribución pueden ser de un origen a un destino, de un origen a muchos destinos o múltiples orígenes y destinos que utilizan centros de trasbordo, a fin de encontrar modelos que permitan resolver estos problemas de manera óptima.

Así, el tipo del producto, medio de transporte y puntos de demanda definen diferentes tipos de redes [9], donde los costos asociados al transporte de productos agrícolas representan un porcentaje bastante alto del costo final [10], lo que puede representar entre el 20 y 30% del costo final del producto [8] [10].

En la literatura se han encontrado estudios relacionados con la optimización de la CSA. Por ejemplo, en [5] se presenta un modelo para la planificación de la distribución de la cadena de suministro de carne de pollo en Tlemcen, Argelia. El autor aplicó el modelo de problema de Asignación a fin de redefinir la cadena de tal manera que se minimizara la distancia recorrida por los clientes para llegar a los centros de distribución del producto. Además, en [6] se presenta un modelo para el análisis de un sistema de centros de distribución a través de una red unida a los sitios de producción. Se utilizó programación mixta para minimizar el costo total de la red, incluyendo costos de transporte, bienes e infraestructura.

Adicionalmente, en la literatura [11] se presenta un modelo de decisión basado en programación lineal a fin de determinar las políticas de empaque y distribución de productos congelados en Colombia. Por otra parte, [12] se enfoca el análisis en un modelo de optimización de la distribución y ruteo de vehículos para productos frescos.

Finalmente, diferentes autores presentan otras aplicaciones utilizando modelado y simulación de productos agrícolas ([13], [14], [15], [16], [17], [18]),

donde analizan y comparan diferentes modelos y su aplicación en diferentes contextos y productos.

3. Descripción del problema

La Provincia de Chiriquí provee cerca del 80% de las legumbres y vegetales que se consumen en la República de Panamá [19]. Por otra parte, la Provincia de Panamá, en especial la Ciudad de Panamá con cerca del 50% de la población nacional, consume más del 60% de estos productos. Adicionalmente, es necesario distribuir estos productos al resto de las provincias, tal y como se ve en la figura 1.

Como se ve en la referida figura, los productos son transportados desde tierras altas de Chiriquí (Cerro Punta y Boquete) a los diferentes centros de población y distribución. Estos puntos son la Ciudad de David, donde se distribuyen los productos al resto de la provincia y a la Provincia Bocas del Toro; la Ciudad de Santiago, donde se distribuye al resto de la provincia, a la región de Azuero y a Coclé.



Figura 1. Rutas de distribución de vegetales de tierras altas [2].

Adicionalmente, existen rutas exclusivas que llevan el producto desde los centros de producción al Mercado de Abastos de la Ciudad de Panamá, de donde se distribuye no solo en la región metropolitana, sino a las provincias de Panamá Oeste, Colón y Darién. Esta distribución se hace en tres tipos de vehículos a saber: “pick ups”, camiones y “trailers” o mulas, vehículos que se utilizan de acuerdo al costo, capacidad, disponibilidad y preferencias del productor.



Figura 2. Modalidades en el transporte de vegetales.

En la figura 2, es posible apreciar algunas de estas modalidades, que no siempre cumplen con las normas existentes de transporte y conservación de alimentos.

De acuerdo a la Secretaría de la Cadena de Frío [19], la interface entre los productores, supermercados o mercados públicos está monopolizada por intermediarios, que son transportistas que brindan el servicio de carga o que compran en el sitio de producción y revenden en los puntos finales, lo que aumenta el costo final del producto. Estos transportistas mueven o revenden cerca del 60% de la producción local de vegetales, mientras el 40% es transportado por empresas privadas que tienen su propia CSA.

El objetivo de este Proyecto es el de presentar un modelo de optimización que ayude a encontrar no solamente el costo mínimo de satisfacer la demanda de productos considerando la oferta existente, sino proponer la asignación óptima de vehículos que permita la distribución óptima de productos. Adicionalmente se pretende analizar diferentes escenarios de tal manera que se pueda proponer la ubicación óptima de una, o varias, plataformas logísticas que permita la distribución óptima de productos a los diferentes mercados. No se ha encontrado en la literatura un estudio similar conducido en la República de Panamá.

4. Descripción del modelo matemático

A fin de proponer un modelo matemático que permita resolver el problema propuesto, se definen una serie de supuestos que se explican a continuación:

- Solamente se estudiará la lechuga en este momento. Se seleccionó este producto por recomendación de la Secretaría Nacional de la Cadena de Frío.
- La oferta y la demanda en diferentes fuentes y destinos se considerará semanal.
- No se considerará inventario en los puntos intermedios.
- Solamente se considerarán los tres tipos de vehículos mencionados.
- Toda la información referente a costos, oferta, demanda y disponibilidad de vehículos es conocida.
- La carga unitaria será la caja de 40 lbs. (18 kg) de lechuga.
- No se considerarán los tiempos de carga y descarga de los vehículos, así como las mermas en cosecha.
- Los costos se pueden dividir en dos grandes rubros: los costos de transporte por caja, que incluyen los costos de producción y manejo y los costos

relacionados con combustible, operaciones y depreciación.

- El precio de la caja no está considerado en el análisis ya que depende del distribuidor en el centro final de ventas.
- Aunque no hay limitaciones en la disponibilidad de vehículos en los puntos de origen, se requiere tener un mínimo de ellos.
- El modelo no incluye cambios en volumen por temporada.

A fin de desarrollar el modelo, se utilizó el enfoque de Redes de Flujo de Costo Mínimo [20]. Sea una red genérica G definida por $G = (V, A)$, donde V es el conjunto de vértices representando los centros de producción, distribución o mercados finales y A los arcos que conectan estos centros. Cada arco puede ser definido en función a un par de índices i, j indicando el origen y destino de cada uno. A su vez, cada arco puede tener un costo de transporte asociado y una capacidad.

Sea $x_{i,j}$ la cantidad de producto (cajas de lechuga) enviada del punto i al punto j . Adicionalmente, considere $y_{i,j}^{(k)}$ la cantidad de vehículos k utilizados para transportar el producto desde el punto i al punto j .

Sea además c_{ij} el costo de mover una caja de i a j y $b_{i,j}^{(k)}$ el costo de mover un vehículo k del punto i a j . Adicionalmente, considere los puntos de distribución o trasbordo l que se considerarán para definir la política de transporte del sistema logístico que se recomendará.

El objetivo del modelo es el de optimizar la cantidad de producto enviado desde los puntos de producción a los mercados finales y la cantidad y tipo óptimo de vehículos utilizados para cumplir con la política de distribución.

Considérense los siguientes parámetros:

- Z : Costo total óptimo de la política de transporte.
- $N_i^{(k)}$: Cantidad de vehículos tipo k disponibles en el punto i .
- $A^{(k)}$: Capacidad de carga del vehículo tipo k en término de cajas de 40 lbs.
- S_i : Oferta semanal en el punto i .
- D_j : Demanda semanal en el punto j .
- W_l : Capacidad semanal de los puntos de trasbordo l .
- M : Número de orígenes.
- N : Número de destinos.
- L : Número de centros de distribución.
- K : Tipo de vehículos.

El modelo se describe a continuación:

- La función objetivo es:

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j c_{i,j} x_{i,j} + \sum_i \sum_j \sum_k b_{i,j}^{(k)} y_{i,j}^{(k)} \quad (1)$$

Sujeto a:

- Capacidad semanal de las fuentes o centros de producción:

$$\sum_i x_{i,j} \leq S_i \quad \forall j \quad (2)$$

Esta restricción requiere que los diferentes centros de producción envíen cuanto más su capacidad de producción, o sea, el límite superior de la política de distribución es equivalente a la capacidad de producción de las fuentes.

- Demanda semanal de los puntos de destino:

$$\sum_j x_{i,j} \geq D_i \quad \forall i \quad (3)$$

Para cada destino final, la cantidad enviada no debe ser menor que la demanda estimada.

- No hay inventario en los puntos de trasbordo o distribución:

$$\sum_l x_{i,l} = \sum_l x_{l,i} \quad \forall i \quad (4)$$

Debido al poco tiempo de vida de la lechuga, no se permitirán inventarios en los diferentes puntos de origen, destino ni distribución.

- Capacidad semanal de los puntos de distribución:

$$\sum_i x_{i,l} = W_l \quad \forall l \quad (5)$$

Cada centro de distribución tiene una capacidad de almacenamiento que debe satisfacerse para poder cumplir con la política de envío.

- Disponibilidad semanal de los vehículos:

$$\sum_k \sum_j y_{i,j}^{(k)} \leq N_i^{(k)} \quad \forall k, j \quad (6)$$

La cantidad de vehículos utilizados en cada punto de envío debe ser menor o igual a la cantidad disponible de cada uno de ellos.

- Capacidad semanal de transporte de los vehículos:

$$\sum_j A^{(k)} y_{i,j}^{(k)} - \sum_j x_{i,j} \geq 0 \quad (7)$$

En cada centro de envío, la capacidad de los vehículos disponibles debe ser mayor a la cantidad de producto a enviar a los diferentes puntos de destino.

- Todas las variables son enteras, no se permiten fracciones de caja o fracciones de vehículos.

5. Resultados obtenidos y discusión

A fin de levantar los datos necesarios para definir el contexto del modelo y encontrar la solución del mismo, estudiantes de los programas de Logística y Transporte Multimodal e Ingeniería Industrial de diferentes sedes de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), junto a estudiantes del Programa de dual UTP – Georgia Institute of Technology de Maestría en Ingeniería de la Cadena de Suministros y del programa de Maestría en Transporte y Logística Internacional de la Universidad Marítima Internacional de Panamá (UMIP) reunieron la información preliminar en la Ciudad de Panamá y en varios lugares de todo el país con el fin de conocer la situación y comprender el comportamiento de la distribución de las lechugas, papas, tomates y cebollas en estos puntos.

La información de estas fuentes se recogió a través de entrevistas y cuestionarios aplicados a un grupo de actores que fueron seleccionados más por conveniencia que por la selección al azar. Se recogieron datos tales como los costos de transporte, costos de operación, la disponibilidad de vehículos, la capacidad de producción, la demanda del mercado, almacenes y capacidades de distribución.

Adicionalmente, se utilizó información de la Secretaría Nacional de la Cadena de Frío y del Instituto de Mercadeo Agropecuario [19] lo que permitió a los investigadores obtener datos de producción. Por otra parte, los datos obtenidos de estas organizaciones ayudaron a los investigadores a comparar esta información con la recogida de los proveedores y los consumidores, ya que la misma no era similar para las diferentes fuentes.

Las tablas 1 y 2 muestran los principales datos del problema, mientras la Tabla 3 muestra un resumen de la solución óptima, la cual se encontró utilizando el *software* MPL® [21].

Tabla 1. Información relevante para el caso

	Pick up	Camión	Trailer
Capacidad, en cajas, de los vehículos	35	75	250
Costo de Combustible, por viaje	\$ 70.00	\$ 100.00	\$ 600.00
Costo de transporte, por caja	\$ 1.25	\$ 1.25	\$ 1.25
Costo de empaque, por caja	\$ 1.75	\$ 1.75	\$ 1.75
Costo de manejo, por caja	\$ 0.05	\$ 0.05	\$ 0.05
Costo de mano de hora, por embarque	\$ 25.00	\$ 25.00	\$ 25.00
Costo operativo por viaje	\$ 95.00	\$ 125.00	\$ 625.00

Tabla 2. Demanda mensual de cajas de lechuga

David	2,000
Santiago	1,850
Chitré	1,300
Las Tablas	500
Aguadulce	550
Penonomé	650
Chorrera	2,100
Arraiján	2,000
Ciudad de Panamá	6,000
San Miguelito	1,800
Colón	2,300
Total	21,050

Tabla 3. Solución óptima

Costo total	\$ 19,442.50
Para distribuir 5, 264 cajas semanales a todo el país	
Costo de transporte	\$ 11,147.50
Costo de vehículos	\$ 8,295.00
Vehículos utilizados	
23 Pick-ups	
36 Camiones	
10 Tráileres	

El resultado óptimo mostrado en la tabla 3 muestra que la política óptima de distribución de lechugas consiste en enviar 5,264 cajas a la semana a los diferentes puntos de demanda a un costo total de

\$19,442.50. Para lograr dicho objetivo se utilizarán 23 *pick-ups*, 36 camiones y 10 tráileres a un costo total de \$8,295.

El modelo considera que la demanda total será satisfecha enviando todo el suministro desde los puntos de producción, tomando en cuenta que los productos serán enviados a los puntos intermedios de Santiago y Mercado de Abastos, de donde se distribuirán a los consumidores finales.

Adicionalmente, el modelo sugiere la cantidad óptima de vehículos necesarios para cumplir con la política de distribución óptima. Estos vehículos satisfacen no solamente la demanda existente, sino también la cantidad disponible de vehículos en los diferentes puntos de distribución. El modelo propone el uso de equipos pequeños para distancias cortas, mientras que los vehículos más grandes para distancias y demandas mayores, aprovechando así el concepto de economía de escalas.

Hay que recordar que el modelo supone solamente el transporte de lechuga, por lo que los vehículos no comparten espacio con otros productos.

Una vez que el modelo fue ejecutado, fue posible desarrollar un análisis de costos. Como se muestra en la tabla 4, cerca del 31% de los costos están relacionados con el transporte del producto, lo que confirma el hecho de la influencia de los intermediarios en el costo final de los productos agrícolas en Panamá.

Tabla 4. Análisis de costos de la política de envíos

Precio promedio por caja	\$ 12.00
Total de cajas enviadas	5,264
Valor total del envío	\$ 63,168.00
Costos de transportes	\$ 19,442.50
Fracción del valor total	30.80%



Figura 3. Escenarios para diferentes plataformas logísticas [4].

Finalmente, se ensayaron diferentes ubicaciones para las posibles plataformas logísticas. La figura 3 [4] muestra las diferentes iteraciones, bajo escenarios de producción y distribución diferentes.

A través del modelo se pudo determinar que la localización de la plataforma logística cerca del mercado central (o en ella) disminuiría los costos de logística cerca de 4%. Este porcentaje puede ser mejorado si se incorporan otras áreas de producción y se aplican mejores políticas de transporte por los productores. Con las políticas correctas, los costos pueden disminuir, desde el actual 31%, hasta un 12%, por lo que es necesario que los productores, transportistas y el gobierno definan políticas conjuntas que garanticen no sólo la disponibilidad de alimentos, sino también a un costo accesible para los consumidores.

6. Conclusiones y trabajo futuro

El modelo desarrollado permitió generar una solución con una política óptima de distribución y uso de equipos. El uso de equipos de diferentes tamaños y las cantidades movidas entre los diferentes puntos de la red están ligados a los diferentes costos y capacidades definidos.

La política óptima, aunque ideal, no es realista ya que supone que los transportes van llenos de lechuga, cosa que no es cierta ya que estos equipos llevan una combinación de productos, y no necesariamente vienen llenos.

De los resultados obtenidos es posible concluir que cualquier política de distribución debe tomar en cuenta no solamente la oferta y demanda de los productos. También se debe tomar en cuenta las facilidades de almacenamiento y distribución, así como los equipos utilizados para movilizar los productos.

Es importante mencionar que la falta de información relativa a la demanda y oferta de productos agrícolas es una limitante real. No hay realmente información confiable en las fuentes oficiales o no oficiales existentes. Así, se hace muy difícil obtener soluciones reales aplicables a una política nacional de distribución de productos y alimentos en Panamá. La incongruencia entre la información encontrada en diferentes fuentes hace muy difícil validar los resultados del modelo, aunque permite dar una idea del comportamiento del sistema logístico de alimentos en Panamá.

Es esencial que las diferentes organizaciones involucradas en la cadena agroalimentaria trabajen de manera coordinada y compartan información, tecnología y recursos de tal manera que la cadena se mantenga de manera efectiva para productores, distribuidores y consumidores finales.

Como trabajo futuro, es necesario ampliar el modelo utilizando más productos, lo que hace que el modelo se comporte como un modelo de flujo de productos múltiples [20] el cual se hace más complicado al adicionar una mayor cantidad de productos y adicionalmente considerando que además de minimizar el costo de transporte y distribución se buscaría maximizar el valor de cada embarque de productos. Por lo anterior, el problema se convierte en un problema de objetivo múltiple de flujo mínimo con múltiples productos, con asignación de equipos de transporte.

7. Agradecimiento

Los autores quieren agradecer a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Panamá, por el apoyo a la realización de este trabajo de investigación gracias al financiamiento a través del Proyecto FID-069 "Diseño de una plataforma logística a través de la optimización de redes de distribución para el sector agrícola."

8. Referencias

- [1] Contraloría General de la República de Panamá, «Principales indicadores económicos de la República de Panamá», www.contraloria.gob.pa, Accesado el 14 de junio de 2015, 2014.
- [2] H. Álvarez y A. Orozco, «Modeling a distribution network of agricultural products in Panama.» de *Proceedings of the Industrial and Systems Engineering Research Conference*, San Juan, Puerto Rico, Institute of Industrial Engineering, 2013, pp. CD-Published.
- [3] H. Álvarez, A. Orozco y N. Martez, «Design of a logistic platform through the optimization of agricultural distribution networks in Panama.» de *Proceedings of the 17th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modeling and Simulation*, Bergeggi, Italy, I3M, September 21-23, 2015.
- [4] A. Orozco, *Diseño de una plataforma logística a través de la Optimización de Redes de Distribución para el Sector Agrícola*, Tesis de Maestría: Universidad Marítima Internacional de Panamá, 2014.
- [5] F. Boudahri, J. Bannekrouf, F. Belkaid y Z. Sari, «Application of a Capacitated Center Clustering Problem for Design of Agricultural Supply Chain Network.» *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 9, n° 4, pp. 1694-1714, 2012.
- [6] H. Etemadnia, «Optimal wholesale facilities within the fruit and vegetables supply chain with bimodal transportation options: An LP-MIP heuristic approach.» *European Journal of Operations Research*, n° 244, pp. 648-661, 2015.
- [7] C. Daganzo, *Logistics Systems Analysis*, Springer-Verlag: Nueva York, Estados Unidos., 1992.
- [8] D. Tan, «Developing Agricultural Products Logistics in China from the Perspective of Green Supply Chain.» *International Journal of Business and Management*, vol. 7, n° 21, pp. 106-112, 2012.
- [9] M. Estrada, *Análisis de estrategias eficientes en la logística de distribución de paquetería*, Disertación Doctoral: Universidad Politécnica de Cataluña, 2007.
- [10] D. Agra, *Localización de centros de intercambio modal y plataformas logísticas.*, Tesis de Maestría: Universidad Politécnica de Cataluña, 2008.
- [11] G. Mejía y E. Castro, «Logistics Optimization in a Colombian Frozen and Refrigerated Foods Company.» *Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombi*, n° 26, pp. 47-54, 2007.
- [12] S. Zhang, Q. Hu y D. Wang, «Research of Fresh Agricultural Products Logistics Vehicle Optimization.» *International Journal of Intelligent Information Processing*, vol. 2, n° 2, pp. 45-58, 2011.
- [13] A. Weintraub y C. .. Romero, «Operations Research Models and the Management of Agricultural and Forestry Resources: A Review and Comparison.» *Interfaces*, vol. 36, n° 5, pp. 446-457, 2006.
- [14] G. Brinza, «Simulation and optimization in Supply Chain.» *Procedia Economics and Finance*, vol. 3, pp. 635-641., 2012.
- [15] Y. R. Perdana, «Logistics Information System for Supply Chain of Agricultural Commodity.» *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 65, pp. 608-613, 2012.
- [16] K. Piewthongngam, «Systems dynamics modelling of an integrated pig production supply chain.» *Biosystems Engineering*, n° 127, pp. 24-40., 2015.
- [17] W. Jan y K. Klein, «Supply Chain Models for Small Agricultural Enterprises.» *Annals of Operations Research*, vol. 190, n° 1, pp. 359-374, 2011.
- [18] P. Jones, T. Lowe, R. Traub y K. G., «Matching Supply and Demand: The Value of a Second Chance in Producing Hybrid Seed Corn.» *Manufacturing and Service Operations Management*, vol. 3, n° 2, pp. 122-137, 2001.
- [19] Secretaría Nacional de la Cadena de Frío de la República de Panamá, *Información estadística*, Available at <http://www.cadenadefrio.gob.pa>.: Accessed on June 14, 2015., 2012.
- [20] M. Bazaraa, J. Jarvis y H. Sherali, *Linear Programming and*

Network Flows, Nueva York, Estados Unidos: Wiley Interscience, 2005.

[21] Maximal Software Corporation, *MPL Modeling Systems*, Release 4.2d, 2004.

Un sistema de trazabilidad basado en web para la genética de ganado en Panamá

A web-based traceability system for cattle genetics in Panamá

Vladimir Villarreal¹, Abner Caballero¹

¹Universidad Tecnológica de Panamá

vladimir.villarreal@utp.ac.pa, abner.caballero@utp.ac.pa

Resumen— La trazabilidad es la capacidad de verificar la historia, la ubicación, o la aplicación de un elemento por medio de la identificación documentada grabada. Una de las muchas ventajas en la aplicación de la trazabilidad en el sector ganadero es que podemos certificar el origen de los animales; esto mejora la credibilidad y garantiza su calidad. Con la aprobación de las leyes de trazabilidad en Panamá hay una necesidad de herramientas tecnológicas que permitan mantener los registros de trazabilidad actualizados y accesibles. Este proyecto fue desarrollado como una solución y apoyo al ganadero de contar con tecnología oportuna para mejorar los procesos asociados con la trazabilidad pecuaria, registro oportuno y en tiempo real del ganado a través de un sistema de información.

Palabras claves— Ingeniería de Software, Modelado Ágil, Servicios Web, Trazabilidad.

Abstract— Traceability is the ability to verify the history, location, or application of an item by means of documented recorded identification. One of the many advantages in the application of traceability in the livestock sector is that we can certify the origin of animals; this improves credibility and guarantee its quality. With the approval of laws traceability in Panama there is a need for technological tools to keep records updated and accessible traceability. This project was developed as a solution and support for the livestock for timely technology to improve processes associated with livestock traceability, timely recording and real-time cattle in a information system.

Keywords— Software Engineering, Agile Modeling, Web Service, Traceability.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 27 de enero de 2016

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

1. Introducción

La trazabilidad se define como la habilidad para rastrear la historia, aplicación o localización de un elemento por medio de identificaciones registradas [1]. Entre las ventajas que ofrece la trazabilidad están los beneficios y mejoras de negocio como por ejemplo: mayor eficiencia en procesos de producción, menores costes ante fallos, mejor servicio a clientes, etc. [2].

La implementación de la trazabilidad en el sector agropecuario contribuye a mejorar la sanidad animal y la inocuidad de los alimentos. Permite identificar el origen y mantener un registro de todos los procesos tanto sanitarios como de manufacturación que se han realizado. El hecho de poder seguir el rastro de toda la vida útil de un producto aumenta la seguridad y la credibilidad del mismo. De este modo se garantiza la

calidad de los alimentos y se aprueban como aptos para el consumo [3].

En la sociedad globalizada en que vivimos, para exportar nuestros productos hacia otros mercados es necesario adecuarnos a estas prácticas y estándares [4]. La aplicación de la trazabilidad en los alimentos se ha convertido en un requisito fundamental para garantizar la seguridad alimentaria; es responsabilidad del estado velar por la inocuidad de los alimentos consumidos en el territorio nacional, tanto como los destinados a la exportación.

Por este motivo, en Panamá se ha aprobado el proyecto de Ley No. 342 de Trazabilidad Pecuaria, que permite que los productores, comerciantes y consumidores conozcan la trayectoria del animal desde su nacimiento hasta que se convierte en alimento [5], a través de la implementación de sistemas que permitan

rastrear un animal desde su origen-destino, así como todos los controles sanitarios a los que se sometió [6].

La Asociación de Productores de Ganado Lechero de Panamá (APROGALPA) es un gremio no lucrativo, creado para velar por los intereses de los productores de leche de todo el país, el mejoramiento de las razas y productividad lechera. Que tiene como uno de sus objetivos impulsar el uso de ganado mejorado y seleccionado por parte de todos los productores de leche del país. Para este propósito mantiene una base de datos con la información de sus asociados que permite rastrear su ganado bovino y expedir un certificado de registro que garantice su origen [7].

El objetivo principal de este trabajo consiste en el diseño, desarrollo e implementación de un sistema que optimice los procesos de trazabilidad asociados al registro de ganado en APROGALPA, mediante el uso de tecnologías basadas en la Web. Esto permite a los productores estar más involucrados en todas las fases del proceso de traza de su ganado. Se ha hecho un aporte al campo de los sistemas de información, aplicando tecnología en el sector ganadero, a través del proceso de trazabilidad que se está implementando en nuestro país. Este sistema aporta grandes beneficios en todo este proceso que actualmente no cuenta con sistemas adaptables y que faciliten el almacenamiento, procesamiento y actualización de datos que posteriormente pueden utilizarse para generación de indicadores o estadísticas acorde a las necesidades del sector ganadero. Podemos integrar los datos del sistema con los registros generados desde los lectores de aretes de almacenamiento de perfil del ganado, a través del registro generado por el sistema.

2. Conceptualizando la trazabilidad

Según el artículo No. 3 del Reglamento Europeo 178/2002 "la trazabilidad es la posibilidad de encontrar y seguir el rastro, a través de todas las etapas de producción, transformación y distribución, de un alimento, un pienso, un animal destinado a la producción de alimento o una sustancia destinados a ser incorporados en alimentos o piensos o con probabilidad de serlo" [8].

En la Norma ISO 8402 se especifica que "la trazabilidad o rastreabilidad es la habilidad para rastrear la historia, aplicación o localización de un elemento por medio de identificaciones registradas" [9].

Por su parte, en Panamá, el Artículo 4 del proyecto de Ley que establece el Programa Nacional de Trazabilidad Pecuaria define trazabilidad o

rastreabilidad como la "capacidad para identificar el origen del producto y las actividades realizadas a través de una o varias etapas especificadas de su producción y transformación hasta la entrega del producto al consumidor" [5].

Basándonos en las definiciones anteriores podemos decir que la trazabilidad consiste en tener un registro de un producto que nos permitirá conocer su materia prima, además de los lugares y procesos por los que ha pasado desde su origen, hasta su destino final.

Por esa misma estructura, podemos clasificar la trazabilidad en tres bloques principales [2].

- La "trazabilidad hacia atrás" que corresponde con saber el origen de cada producto o componente.
- La "trazabilidad de proceso" que consiste en saber la composición detallada de cada elaborado.
- La "trazabilidad hacia delante" que se basa en saber a qué clientes has enviado cada lote de producto que has servido desde tu empresa.

La Asociación de Productores de Ganado Lechero de Panamá (APROGALPA) hace uso de una aplicación de trazabilidad hacia atrás mediante un registro de los productores de la región, sus fincas y la genética de sus animales.

Este registro permite mantener un control sobre el ganado mejorado garantizando el valor del animal y evitando problemas como el de la consanguinidad que podría darse con las futuras crías de ganado.

3. Análisis del problema

Presentamos un análisis detallado del problema detectado en el registro del ganado bovino en Panamá.

3.1 Definición del problema

Debido a que en los últimos años se vienen usando masivamente los toros padres más populares en el mercado, hay un riesgo potencial incremento de consanguinidad, a menos que los criadores activamente eviten el apareamiento entre parientes cercanos.

La consanguinidad es el apareamiento entre animales que tienen uno o más antepasados en común. Cuanto más cercano sea el parentesco, mayor será la consanguinidad en la progenie resultante.

La consanguinidad puede utilizarse para producir individuos superiores, sin embargo, el riesgo es que ocurra una depresión por consanguinidad o que se junten genes recesivos indeseables. La pérdida resultante de esta estrategia puede ser muy alta, pues como esta clase de genes indeseables se expresa en la descendencia, en esta habrá que aplicar un alto descarte.

Es por esto que la consanguinidad ofrece pocos beneficios económicos para los productores comerciales [10].

En APROGALPA, se ha llevado un registro con la raza, los parientes, el propietario del animal, entre otros. Sin embargo, debido a la antigüedad del mismo existen muchas limitaciones que impiden llevar un control adecuado de la trazabilidad ni el seguimiento que se desea con respecto a la consanguinidad y genética del animal. Esta aplicación carece de interfaces de usuario amigables, no es adaptable a dispositivos móviles y carece de módulos para actualización del árbol genealógico del ganado desde bases de datos externas, entre otras.

La aplicación, además carece de soporte técnico en actualización de registros y de migración y actualización de datos lo que conlleva a que se registren datos erróneos o repetidos.

3.2 Solución propuesta

Se propone el desarrollo de un sistema de almacenamiento, procesamiento y presentación de datos con un entorno *Web*, que permita el acceso tanto a los empleados de APROGALPA como a sus asociados. Al ser una aplicación accesible mediante *Web*, debe tener un diseño adaptable para ser usado correctamente tanto en computadoras personales como en dispositivos móviles.

El sistema consistirá de un portal con dos secciones, una sección donde el empleado realizarán los registros de nuevos ganados y la generación de los certificados correspondientes, y por el otro lado una sección para los productores donde el asociado podrá ver sus propios registros. Mediante un sistema de roles-permisos, se controla el acceso a las distintas funciones del sistema.

El sistema registrará la información en una base de datos y se creará un módulo que maneje las funciones de crear, leer, actualizar y borrar (por sus siglas en inglés *CRUD* “*Create, Read, Update & Delete*”) en cada uno de los modelos de datos principales.

4. Materiales y métodos

Para el desarrollo del sistema se eligió una metodología de desarrollo ágil, al considerarse la más acorde con el tipo de proyecto. *Agile Modelling (AM)* es una metodología basada en la práctica para una documentación y modelado efectivo de sistemas *software* [11]. *AM* no es una metodología completa, sino más bien una colección de valores, principios y prácticas que conllevan a un modelado ligero efectivo.

Agile Model Driven Development (AMDD) es, como su nombre lo implica, la versión ágil del *Model Driven Development (MDD)* [12]. Mientras en el *MDD* tradicional se crean modelos complejos antes de empezar la fase de codificación, en *AMDD* se crean modelos ágiles que son lo suficientemente buenos para describir el desarrollo en general como podemos apreciar en el ciclo de desarrollo (figura 1).

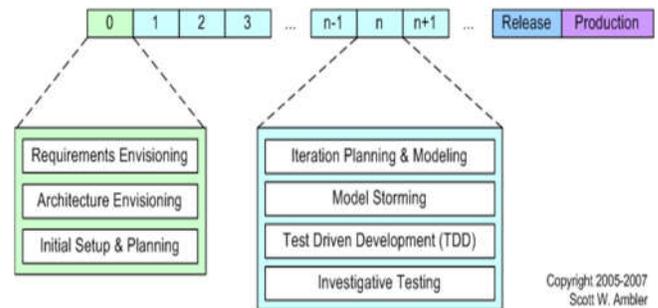


Figura 1. AMDD en el ciclo de desarrollo ágil.

Una de las ventajas de la metodología *AMDD* y el motivo principal de su elección en este proyecto es que, al desarrollar solamente los modelos necesarios, se dedica más tiempo a la codificación y pruebas de *software*. Este cambio con respecto a las metodologías tradicionales acelera el desarrollo y aumenta la productividad.

En la especificación de la metodología se detallan todos los modelos que se recomiendan para cada una de las fases del desarrollo. La implementación final de la metodología incluye los modelos de casos de uso, tarjetas *CRC* (*Class-Responsibility-Collaboration*) y casos de prueba para cada uno de los componentes del sistema.

Uno de los fundamentos básicos de *AMDD* es *Test-Driven Development (TDD)*, que consiste en crear un caso de prueba primero, luego crear un código que complete la prueba satisfactoriamente y refactorizar de ser necesario. Este método de desarrollo, permite tener un código limpio y programar solo las funciones necesarias para el sistema.

Esta es una metodología muy práctica a la hora de tener que diseñar modelados y documentación, ya que proporciona información de cómo poder realizarlos de una manera ágil, logrando entregar modelos y documentos que realmente sean de importancia para el usuario y eliminando los datos que sean innecesarios. En el punto 4.4 de este artículo se detalla el uso o implementación de *AM*.

4.1 Patrones de arquitectura y diseño

Los patrones arquitectónicos y de diseño utilizados están basados en el *framework* mediante el cual se construyó la aplicación y siguiendo los principios *SOLID* (*Single responsibility*, *Open-closed*, *Liskov substitution*, *Interface segregation and Dependency inversion*) para el desarrollo de *software*. *SOLID* hace referencia a los cinco principios de diseño orientado a objeto creado por Robert C. Martin. El uso de estos principios hacen que nuestra aplicación sea fácil de mantener y actualizar con el tiempo.

4.1.1 Modelo-Vista-Controlador (MVC)

Es un patrón de arquitectura de *software* encargado de separar la lógica de negocio de la interfaz del usuario en tres componentes distintos y es el más utilizado en aplicaciones Web. En la figura 2 se detalla el funcionamiento de este patrón, donde la vista es la página HTML y el código que provee de datos dinámicos a la página, el modelo es la abstracción de la Base de Datos y la Lógica de negocio y el controlador es el responsable de recibir los eventos de entrada desde la vista [13].

Los modelos representan los datos de la aplicación, las relaciones de estos datos y las reglas que deben seguir los controladores para manipularlos. Cada entidad del diagrama Entidad-Relación de la figura 3 corresponde una tabla de la Base de Datos, y esta a su vez, a un modelo del sistema.

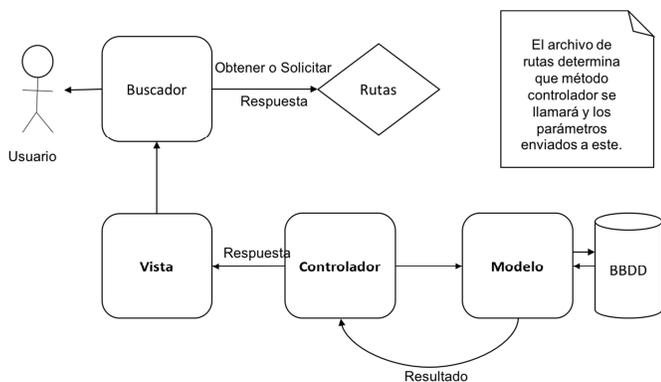


Figura 2. Arquitectura MVC.

4.1.2 Arquitectura basada en componentes

Se enfoca en la descomposición del diseño en componentes funcionales o lógicos que expongan interfaces de comunicación bien definidas. Esto provee un nivel de abstracción mayor que los principios de orientación por objetos y no se enfoca en asuntos

específicos de los objetos como los protocolos de comunicación y la forma como se comparte el estado [14]. El sistema desarrollado se ha dividido en diferentes componentes, lo que facilita su desarrollo y posterior mantenimiento.

4.2 Lenguajes utilizados

Se han utilizado los lenguajes y tecnologías más comunes en el desarrollo web, lo que facilita el desarrollo en las secciones *back-end* y *front-end*. El desarrollo de cada sección está basado en las definiciones de la distribución de los elementos propuestos en el Modelo-Vista-Controlado (*MVC*), lo que permite clasificarlos en las secciones descritas previamente. Luego de la distribución en *MVC*, se procede a la definición de cada componente según los patrones de arquitectura y diseño definidos por *SOLID*.

4.2.1 Back-end

Para el desarrollo del sistema se ha elegido el *framework* para el lenguaje de scripting *PHP Laravel*, en su versión 5.1. Este *framework* de código abierto es el de mayor aceptación actualmente para este lenguaje, gracias a su simplicidad en la sintaxis, su motor de plantillas incorporado, y la potencia para su manejo y de sus muchos complementos.

4.2.2 Front-end

Se utilizan los lenguajes estándar de desarrollo *Web* que son *HTML5*, *CSS3* y *Javascript*. La interfaz de usuario está diseñada con *framework Bootstrap*, que nos brinda un desarrollo rápido, intuitivo y fácilmente adaptable para todas las interfaces.

Se implementó librerías en *javascript* como los son *select2* y *restive.js* para garantizar que el diseño se mantenga adaptable. En la figura 3 podemos ver un selector tal y como se vería en un navegador de escritorio, utilizando la librería *select2* para mejorar el diseño y agregar un buscador. En la figura 4 vemos como el mismo selector cambia para utilizar el nativo del navegador y simplificar la experiencia de uso en pantallas táctiles.



Figura 3. Selector con el *plugin select2* (escritorio).

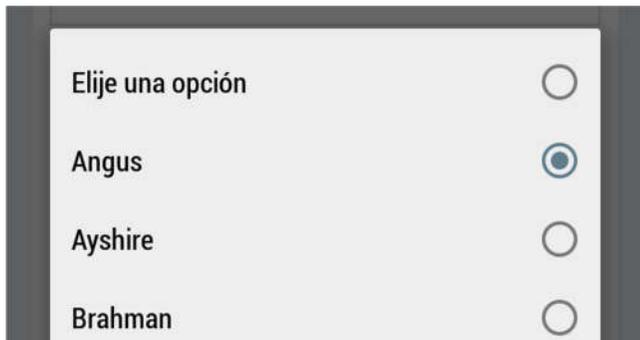


Figura 4. Selector en Firefox para Android (móvil).

4.3 Otras herramientas utilizadas

En las pruebas del sistema se han realizado en el servidor *HTTP* de código abierto *Apache*. Para el sistema de gestión de base de datos se eligió *MariaDB*, un derivado libre de *mySQL* mantenido por la comunidad de *software* libre. Además, que es posible utilizar cualquier gestor de base de datos compatible con el *framework Laravel*. Uno de los elementos más significativos en el desarrollo de este sistema es que está

totalmente desarrollado sobre tecnologías no propietarias.

4.4 Proceso de desarrollo

El procedimiento para implementar el nuevo sistema de registro de APROGALPA se realizó siguiendo los pasos del desarrollo de *software* mediante la metodología *AM*.

En la primera fase del desarrollo (iteración 0) se inició programando reuniones con el cliente para identificar los requisitos principales del sistema. Y estudiando las funciones y debilidades del sistema de registro que se utilizaba anteriormente.

Con este análisis se identificaron los actores principales del sistema y se realizaron los primeros casos de uso e historias de usuario.

Luego de analizados los requerimientos se empezó el diseño de la arquitectura del sistema mediante el desarrollo de un modelo Entidad-Relación para los datos (figura 5).

Los siguientes pasos según el ciclo de desarrollo AMDD corresponden a las iteraciones del ciclo de desarrollo, estas iteraciones se dividieron según las principales características que se identificaron para el sistema.

Para cada iteración se siguieron los pasos especificados según la metodología *AM*. Estos van desde la planificación de las tareas de cada iteración, hasta la creación de los artefactos y el desarrollo de los componentes de *software*.

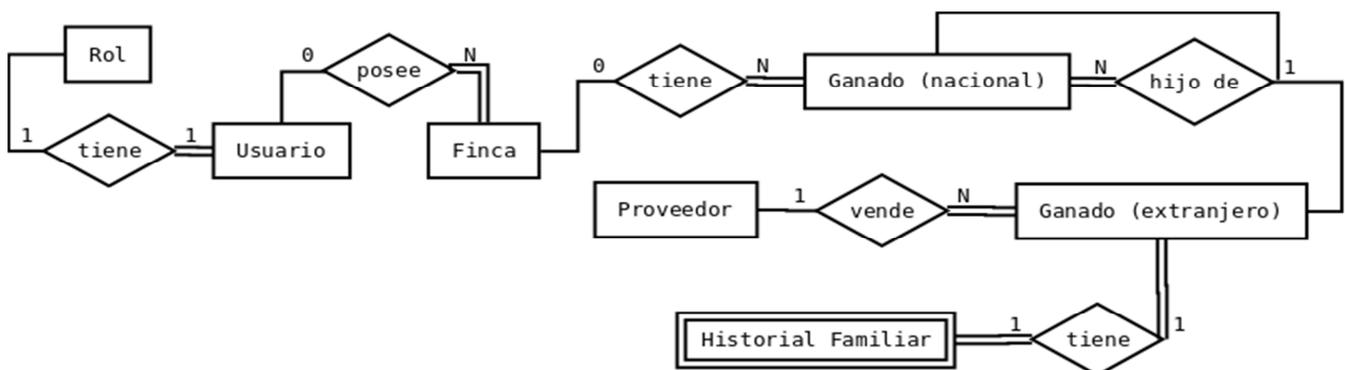


Figura 5. Modelo Entidad-Relación del sistema desarrollado.

5. Características de la propuesta

A continuación, se detallan cada una de las características principales y sus definiciones

identificadas, para tener un mayor entendimiento del funcionamiento de las mismas. Estas características corresponden con los módulos principales del sistema.

5.1 Usuarios

Un usuario es el actor que interactúa directamente con el sistema una vez que se hayan superado las fases de desarrollo correspondientes, con el objeto de consultar, modificar o eliminar la información gestionada por el mismo.

Para que un usuario acceda al sistema (figura 6) debe ser registrado por un administrativo de APROGALPA. El usuario posteriormente a través de su número de cédula accede al sistema y registra una dirección de correo electrónico (si no se especificó antes) y una contraseña de acceso. En caso de pérdida de contraseña un administrativo puede restaurar la cuenta para que el usuario pueda activar su cuenta nuevamente.



Figura 6. Pantalla de inicio de sesión.

Para su registro es necesario saber el nombre, cédula y dirección. Los datos opcionales son el número de teléfono, celular, fax, correo electrónico, correo postal y fecha nacimiento.

5.1.1 Roles

El rol es el papel que cumple un usuario dentro de un componente y que limita el conjunto de funcionalidades que puede desempeñar en ese ámbito dentro del sistema.

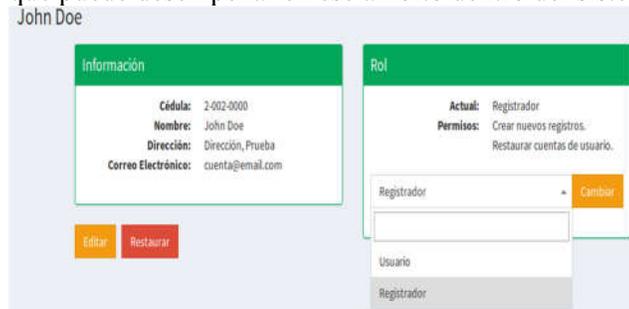


Figura 7. Administración de cuentas.

Existen cuatro niveles asociados a los roles, que detallan los distintos permisos de acceso en el sistema. Estos niveles son los siguientes:

- Nivel 1: Es el usuario no administrativo que tiene acceso a los registros asociados a su propia cuenta.
- Nivel 2: Corresponde a un empleado de la asociación que puede ver todos los registros, así como crear y actualizar los mismos.
- Nivel 3: Puede aprobar un nuevo registro para permitir la generación del certificado, eliminar registros.
- Nivel 4: Puede cambiar los roles, actualizar o cambiar el nivel de acceso de la cuentas.

Un usuario administrativo puede restaurar contraseñas y cambiar roles de los usuarios de menor nivel al suyo, desde la pantalla de administración de cuentas (figura 7).

5.2 Fincas

La finca es la propiedad, oficialmente registrada en el cual se cría el ganado bovino. Cada finca tiene asignada un criador para los animales que puede ser otro productor registrado o propietario de la misma.

En la pantalla de administración de fincas el encargado puede editar los datos y ver los animales con certificado de dicha finca (figura 8).

Para registrar una finca es necesario saber el nombre, código, dirección; además de un propietario y criador previamente registrados.

5.3 Catálogos

Conjunto de datos referente a los padres genéticos de los animales, o sementales que se adquieren mediante los proveedores especializados.

Para su registro es necesario saber el código, nombre, sexo, raza, porcentaje de raza y el proveedor y la dirección web del catálogo donde se encuentra.

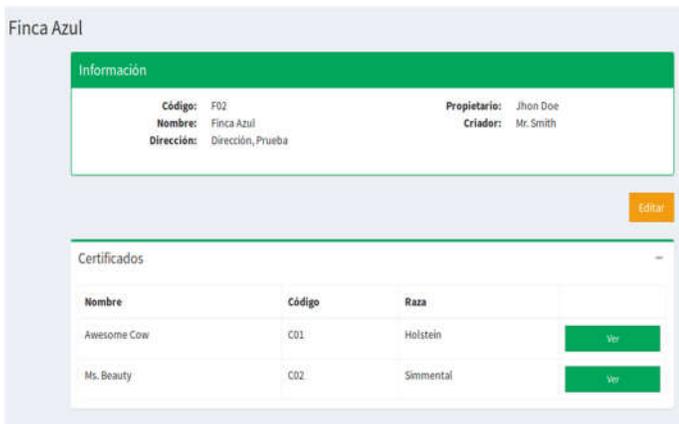


Figura 8. Administración de fincas.

5.3.1 Proveedor

Un proveedor es la empresa dueña de los catálogos de animales y que se encarga de su venta y distribución.

En la figura 9 se muestra la sección de administración de proveedores donde se agregan o editan los mismos. Secciones similares existen para administrar razas y colores de los animales.

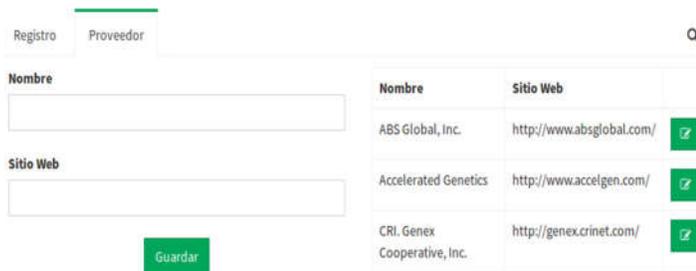


Figura 9. Administración de proveedores.

Para registrar una finca es necesario saber el nombre y la dirección de su sitio *Web*.

5.3.2 Buscador

Un buscador es un componente de la aplicación que se conecta a los catálogos en línea de ciertos proveedores y recupera la información del animal (cuando esté disponible) para automatizar el registro.

En la figura 10 vemos la pantalla de registro con información extraída desde el buscador (el historial genético incluido aunque no visible). En caso que no se encuentre toda la información se extraerá lo más posible y mostrará el error correspondiente.

Este servicio se desarrolló tomando en consideración los catálogos de los tres proveedores más populares del país. Al depender del catálogo en línea de un tercero, es posible que requiera un mantenimiento por futuros

cambios en estos, para garantizar su funcionamiento constante.

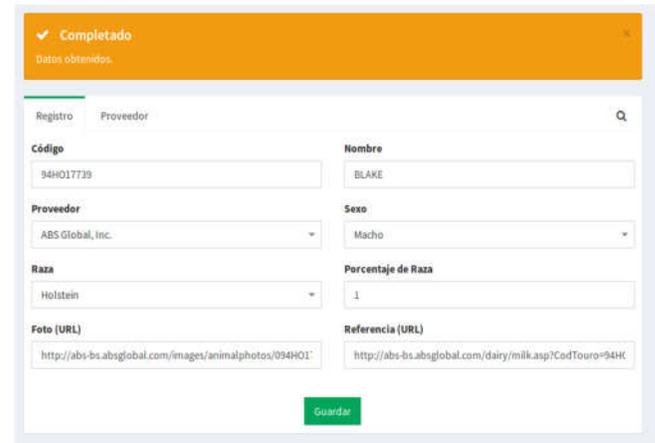


Figura 10. Registro de ganado (extranjero).

5.4 Certificados

Un certificado es un conjunto de datos de un animal determinado que se crea de forma automática durante el proceso de registro. El mismo contiene la información básica, el historial genético del animal y la finca a la que pertenece.

En la figura 11 se muestra la pantalla de administración de certificados desde la cuenta de administrador de sistema (rol de nivel 4). Se puede observar el botón de para aprobar certificados y el área de notificación de certificados pendientes los cuales un registrador (rol de nivel 2) no tendría.

Para cada ganado bovino en el sistema se debe imprimir un certificado de registro como constancia del origen del animal; además de un certificado de transferencia cuando sea requerido. Debe ser posible visualizar la genealogía del animal hasta al menos sus bisabuelos, se muestra en color azul el nombre de los ancestros machos y en color rojo en el caso de las hembras (figura 12).



Figura 11. Administración de certificados.

Para su registro es necesario saber el código, número de registro, nombre, sexo, raza, porcentaje de raza, método de nacimiento, finca a la que pertenece, padre, madre, fecha de nacimiento, fecha de registro y color. Los datos opcionales son la foto del animal, el color de la nariz y orejas.



Figura 12. Árbol genealógico de ganado bovino según raza.

6. Implementación del sistema

Luego de definidos los requerimientos de programación y desarrollo y de definidos los elementos de diseño, se procedió a la implementación del sistema, basado en los lenguajes de programación explicados y las tecnologías adoptadas.

6.1 Instalación de los servicios web

Para la instalación del sistema es necesario configurar un servidor HTTP con PHP en su versión 5.4 o más, el servidor elegido es Apache 2.4.

Para el gestor de base de datos se utilizará MariaDB 10.20 debido a su compatibilidad con framework Laravel.

Una vez completada la instalación de los servicios Web debemos instalar el gestor de archivos del framework llamado Composer; posteriormente podemos instalar el framework desde el gestor de archivos.

Una vez configurado el framework se procede a copiar la carpeta de la aplicación al servidor de producción. Finalmente generamos las migraciones de base de datos, ya antes configuradas, desde el framework. El sistema debe tener permisos de escritura en la carpeta storage, donde se guarda la caché e imágenes entre otros datos.

6.2 Publicación de los servicios web

El usuario final, ya debe poseer un sitio Web en un servicio de hosting extranjero o local, permitiendo la réplica espejo en un servidor local. Por razones de

seguridad los datos se mantendrán en un servidor Web local.

Para completar el proceso de publicación, se configura el sistema bajo un subdominio del sitio principal que apunte a la dirección IP del servidor local en el que se encuentra el sistema.

6.3 Seguridad del sistema

No se contempló el uso de cifrado HTTPS para las comunicaciones cliente-servidor, al considerarse que de momento los datos intercambiados no eran sensibles por ser una aplicación especializada para productores del área. Las contraseñas se almacenan cifradas en la base de datos mediante el algoritmo bcrypt.

Respecto a ataques de SQL Injection tenemos la protección del framework al utilizar distintas capas para estas funciones. Después de ser enviados, los datos del formulario deben pasar por una capa de validación, antes de llegar a la capa que abstrae la comunicación con el gestor de Base de Datos.

También hemos incluido todos los recursos y plugins del front-end localmente, de modo que la aplicación no sea vulnerable a un ataque de Cross-site Scripting desde un servidor externo que no controlamos.

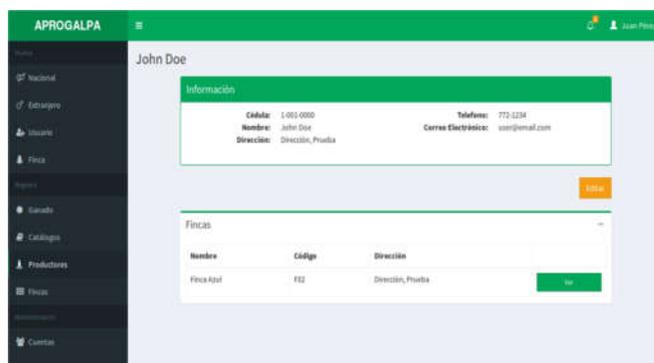


Figura 13. Administración de productores (escritorio).

Con la implementación de roles se separó la sección de administración (Figura 13) de la sección de usuarios (figura 14). A un usuario no administrativo sólo le es posible ver los datos de su cuenta y el estado (aprobado/pendiente) de los certificados de sus propios animales.

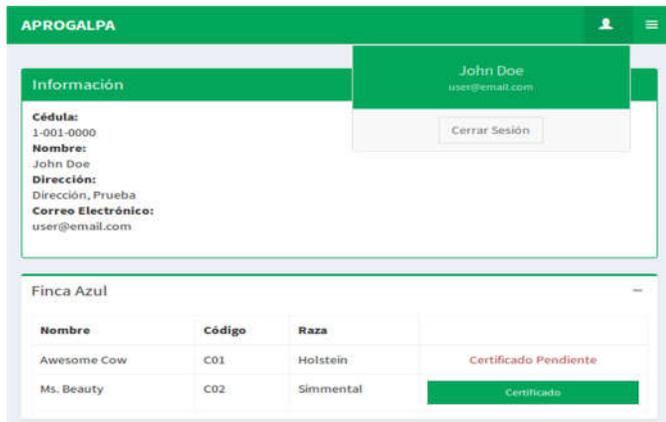


Figura 14. Información de usuario (móvil).

7. Resultados de la investigación

La automatización de todos los servicios de registro de ganado lechero, permitió la estandarización de los procesos en cuanto a captura, procesamiento y almacenamiento de datos del histórico de ganado lechero. A continuación, se listarán algunos resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto, así como los principales beneficios de su implementación.

- Durante este proyecto se optimizó la visualización de la información mediante una interfaz gráfica intuitiva y adaptable a cualquier tamaño de pantalla.
- Al estar basado en la Web permite el acceso desde cualquier lugar con una conexión a Internet y desde cualquier dispositivo con un navegador activo.
- Se ha acelerado el proceso de registro con buscador de sementales desarrollado para encontrar la información en los principales proveedores del país.
- Se ha facilitado y reducido el tiempo en el que se realiza el proceso de aprobación mediante notificaciones de los nuevos registros pendientes de aprobar.
- Se ha involucrado a los productores asociados a ser parte del proceso.
- El productor tiene acceso a los certificados del animal inmediatamente después de su aprobación y ver su estado actual.
- El sistema facilita la detección de problemas de consanguinidad con los animales, mostrando de forma clara la genética de los mismos; esto ayuda al mejoramiento a futuro del ganado en el país.
- Se ha eliminando la necesidad de edición manual de los certificados y muchos otros problemas más, que se presentaban con el sistema anterior, automatizando todo el proceso en base a un único registro.

- Se ha ofrecido una solución tecnológica al sector agroindustrial, específicamente al área ganadera, aunque el sistema desarrollado se puede adaptar fácilmente a otras áreas en donde se quiera registrar algún animal de crianza.

8. Conclusiones y trabajos futuros

El desarrollo de todos los componentes de este proyecto ha sido posible mediante el uso exclusivo de tecnologías libres de código abierto; al no tener que pagar licencias privativas se reduce en gran medida el costo de implementación.

Al utilizar una metodología de desarrollo tan flexible como lo es *AMDD* fue posible enfocarse en la codificación del sistema sin descuidar los modelos y la documentación.

Al programar con *TDD* se reduce la cantidad de código de la implementación final, y el código extra generado para los casos de prueba se convierte en un modelo más del sistema. Como resultado el código es modular, flexible y extensible.

Este sistema es modular y extensible al estar desarrollado con una arquitectura basada en componentes, de forma que se pueden incluir fácilmente mejoras, nuevas funciones o correcciones en el futuro.

El sistema desarrollado es genérico, adaptable y móvil lo que permite su integración no sólo para entorno de ganado bovino sino de otras áreas y su implementación y puesta en marcha es fácilmente adaptable en cualquier ámbito fuera de país. Con esto se hace un aporte en el área de desarrollo especialmente para el sector ganadero que tiene que adaptar sus tecnologías a la exigencias internacionales en cuanto a la traza de ganado, para ofertar productos de calidad y fácil de exportar a otros países.

Se facilita el intercambio de datos entre las asociaciones productoras, el Ministerio de Desarrollo Agropecuario, el Instituto de Desarrollo Agropecuario y el productor final para tener datos que permitan la generación de indicadores y estadísticas para futuros proyectos.

9. Agradecimientos

Agradecimiento especial al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el apoyo financiero en el desarrollo de este proyecto. A la Asociación de Productores de Ganado Lechero de Panamá (APROGALPA) por facilitarnos la

documentación requerida para el desarrollo, implementación y puesta en marcha del sistema.

10. Referencias

- [1] Trazabilidad Panamá. Definición de Trazabilidad [en línea], <http://www.trazabilidadpanama.org/Generales/queestrazabilidad.aspx> [Consulta: 18 noviembre 2015].
 - [2] Hansen, S. Portal Internacional de la Trazabilidad. ¿Qué significa realmente Trazabilidad? [en línea], <http://www.gestiontrazabilidad.com/normativa.php> [Consulta: 10 noviembre 2015].
 - [3] Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición. Guía para la Aplicación del Sistema de Trazabilidad en la Empresa Agroalimentaria [en línea], http://aesan.msssi.gob.es/AESAN/docs/docs/publicaciones_estudios/seguridad/Trazabilidad1.pdf [Consulta: 10 octubre 2015].
 - [4] AgroMeat. Falta de trazabilidad castiga las exportaciones de Panamá [en línea], <http://www.agromeat.com/110163/falta-de-trazabilidad-castiga-las-exportaciones-de-panama> [Consulta: 18 Abril 2015].
 - [5] Gaceta Oficial Digital No. 27420. Panamá. Ley N° 104 de 21 de noviembre de 2013 que crea el Programa Nacional de Trazabilidad o Rastreabilidad Pecuaria [en línea], <http://www.gacetaoficial.gob.pa/pdfTemp/27420/44465.pdf> [Consulta: 15 junio 2015].
 - [6] Ministerio de Desarrollo Agropecuario. Convocatoria para el Curso de Habilitación de Operadores de Trazabilidad Bovina [en línea], http://www.mida.gob.pa/direcciones_id_2836.html [Consulta: 6 febrero 2015].
 - [7] Asociación de Productores de Ganado Lechero de Panamá. Objetivos APROGALPA [en línea], <http://www.aprogalpa.com/index.php/objetivosaprogalpa> [Consulta: 10 marzo 2015].
 - [8] Diario Oficial de la Comunicades Europeas. Reglamento (CE) n° 178/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de enero de 2002, por el que se establecen los principios y los requisitos generales de la legislación alimentaria, se crea la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria y se fijan procedimientos relativos a la seguridad alimentaria [en línea], <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2002-80201> [Consulta: 15 de noviembre de 2015].
 - [9] UNE-EN ISO 8402:1995. Gestión de la calidad y aseguramiento de la calidad. Vocabulario. (ISO 8402:1994) [en línea], <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0013715#.Vx9pSJPhBPM> [Consulta: 18 de noviembre de 2015].
 - [10] Mariano Fernández (2005). Consanguinidad en bovinos, lo que necesita saber. 2005. DOI=http://www.produccion-animal.com.ar/genetica_seleccion_cruzamientos/bovinos_en_general/70-consanguinidad.pdf
 - [11] Amblet, S. An Introduction to Agile Modeling [en línea], <http://www.agilemodeling.com/essays/introductionToAM.htm> [Consulta: 18 mayo de 2015].
 - [12] Amblet, S. Agile Model Driven Development (AMDD): The Key to Scaling Agile Software Development [en línea], <http://agilemodeling.com/essays/amdd.htm> [Consulta: 20 mayo de 2015].
 - [13] Pelaez, J. Arquitectura basada en Componentes. Extractado de La Guía de Arquitectura Versión 2.0a del grupo de Patterns and Practices de Microsoft [en línea] <http://geeks.ms/blogs/jkpelaiez/archive/2009/04/18/arquitectura-basada-en-componentes.aspx> [Consulta: 17 junio 2015].
- [14] devAcademy. #Laravel: Introducción y Conceptos básicos por @jlinformatico [en línea], <http://blog.devacademy.la/post/94202131491/tutorial-laravel-introducción-y-conceptos> [Consulta: 19 agosto 2015].

Mejorando la predicción del síndrome de Down mediante un modelo de clasificación de datos médicos inteligente- Caso de Estudio

Improving Down's Syndrome Prediction with a Smart Medical Data Classification Model- Case of Study

Juan Jose Saldana-Barrios¹, Tomas Concepción², Miguel Vargas-Lombardo^{3*}
^{1,2,3} GISES-CIDITIC, Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales, Universidad Tecnológica de Panamá
¹juan.saldana@utp.ac.pa, ²tomas.concepcion@utp.ac.pa, ³miguel.vargas@utp.ac.pa

Resumen— En el área de la salud la aplicación de medicamentos, realización de cirugías, proyecciones sobre la dispersión de enfermedades infecciosas, estudios del cáncer y otras, características como la precisión y la exactitud son fundamentales. En los últimos años, los métodos de inteligencia artificial conocidos como métodos de aprendizaje de máquinas son cada vez más usados para lograr obtener la mayor precisión y certeza en la predicción y clasificación de datos sensibles para la comunidad médica. Actualmente el método de predicción utilizado para estimar la probabilidad de poseer la Aneuploidía conocida como síndrome de Down utiliza límites inferiores y superiores para indicar si los múltiplos de las medianas conocida como MoMs, son calculados mediante pruebas químicas y se encuentran dentro del rango de una población saludable o anormal. Utilizando estos métodos de aprendizaje de máquinas podemos calcular estos límites dinámicamente. El algoritmo determina los parámetros ajustándose a lo indicado por la misma población mejorando así precisión de la estimación.

En este trabajo primero se propone un modelo para calcular dinámicamente los valores superiores e inferiores que actúan como límite para pronosticar si un paciente presenta o no esta alteración cromosómica. Segundo, el modelo es explicado e implementado y tercero, los resultados obtenidos mediante el método de máquinas de vectores de soporte y clasificadores bayesianos ingenuos son comparados para determinar cuál de los dos proporciona mejores resultados al momento de predecir el riesgo de padecer esta aneuploidía.

Palabras claves— Clasificador Bayesiano Ingenuo, Máquina de Aprendizaje Automático, Máquina de Vectores de Soporte, Síndrome de Down, Salud Electrónica.

Abstract— In health areas like drugs application, surgeries, projection of the spreading of contagious diseases, study of cancer and others, estimation, accuracy and precision are crucial. In the last few years, machine-learning methods have been used to obtain the best precision in prediction and classification of sensitive data for the medical community. Currently the Down's syndrome risk estimation process uses established inferior and superior limits to determine if a chemical test is normal or abnormal. Using machine-learning methods we can calculate these limits dynamically. It would adapt the process to the parameters of the population improving it's results.

In this paper we first propose a model to dynamically calculate the values of the upper and lower limits of a healthy population, second the model is implemented and the process is explained and third we compare the results of applying Support Vector Machine and Naive Bayes machine learning methods to predict the risk of having Down's syndrome.

Keywords— Naïve Bayes, Machine Learning, Support Vector Machine, Down's syndrome, eHealth.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 24 de julio de 2016

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

1. Introducción

Hoy en día, la clasificación de información y el aprendizaje de las máquinas son disciplinas científicas altamente estudiadas dentro del campo de la inteligencia artificial, ya que ellas permiten extraer y analizar

enormes cantidades de datos lo cual es imposible para un ser humano. Adicionalmente, es común encontrar mucha información útil aún cuando esta no está propiamente clasificada, ni estructurada en bases de datos, como lo son la gran variedad de documentos

digitales como exámenes, diagnósticos o recetas. Muchos de los obstáculos encontrados en estas tareas son solucionados utilizando técnicas inteligentes de clasificación de datos. Entre algunas de estas técnicas podemos mencionar las máquinas de vectores de soporte, clasificador bayesiano ingenuo, árboles de decisión, selvas aleatorias y regresión lineal. Dos de estas técnicas la utilizaremos en el contexto del síndrome de Down.

El síndrome de Down, también conocido como trisomía 21, es una aneuploidía causada por la presencia de 3 cromosomas 21. Actualmente, el riesgo de presentar esta enfermedad es calculado utilizando el método de máxima verosimilitud (Likelihood) como base, tomando como punto de inicio la edad de la madre y seguido de algunos factores de corrección como lo son la etnia de la madre, la presencia de diabetes, feto afecto previo entre otros. El segundo método consiste en realizar exámenes químicos analizando la sangre en la madre determinando las MoMs de cada marcador químico. Estos últimos son comparados con un rango de valores superiores e inferiores fijos, estipulados para mujeres latinoamericanas.

En Panamá, especialistas en el campo de cribado prenatal argumentan que una pequeña cantidad de casos de pacientes con síndrome de Down son encontrados en la población indígena de nuestro país. Esto los conlleva a suponer que la variable etnia posee un gran impacto en la estimación del riesgo de poseer la enfermedad y muy probablemente los resultados emitidos por las actuales pruebas deban ser sometidos a un factor de corrección cuando el paciente presenta la etnia indígena, factor que para la etnia indígena del país no se ha calculado aún.

En trabajos anteriores [1], un modelo para la predicción del síndrome de Down fue propuesto. Uno de los componentes del modelo, el cual se encarga de realizar el cálculo del riesgo ha sido implementado y validado sin la utilización de límites superior e inferior fijos. Nuestra intención es poder comparar los resultados emitidos por dicho componente para estimar la presencia de esta aneuploidía utilizando los parámetros poblacionales de mujeres embarazadas de la localidad, aplicando métodos de inteligencia artificial.

El resto del documento está estructurado de la siguiente manera: Sección 2 presenta un estudio del arte sobre la trisomía 21. Sección 3 y 4 explican el funcionamiento de las técnicas conocidas como

máquinas de vectores de soporte y clasificadores bayesianos ingenuos como métodos de clasificación de datos. Sección 5 explica como estos métodos son implementados en el modelo propuesto. La sección 6 presenta los resultados de las pruebas y finalmente la sección 7 las conclusiones y trabajos futuros.

2. Antecedentes

Tal y como se menciona en [1], [2], la trisomía 21, también conocida como síndrome de Down, es una aneuploidía o desorden cromosómico donde el feto presenta 3 cromosomas 21. Esta enfermedad es responsable de múltiples discapacidades físicas en el paciente, algunas las cuales conllevan hasta la muerte del bebé antes de su nacimiento. Las madres cuyos bebés padecen de esta enfermedad presentan problemas prenatales. El síndrome de Down causa defectos cardíacos, características faciales específicas, bajo tono muscular, malformaciones de algunos órganos, crecimiento retardado, déficit mental, desórdenes de audición, visión y otras enfermedades como el Alzheimer.

2.1. Trisomía 21

El tamizaje prenatal, es una prueba sanguínea realizada a la madre del feto para determinar si el mismo presenta el riesgo de padecer de síndrome de Down, defecto de tubo neural, epidermólisis Bullosa, trisomía 18, espina bífida y preeclampsia. El tamizaje o cribado no es un diagnóstico como tal, pero permite predecir la presencia de alguna de estas enfermedades. Si los resultados muestran un alto riesgo de padecer alguna de estas anomalías, se procede a realizar una prueba de tipo invasiva en el feto conocida como amniocentesis, un procedimiento de diagnóstico que extrae líquido amniótico procedente del saco amniótico del útero de la madre insertando una aguja siendo éste algo riesgoso para el feto. Mientras más exacta es la prueba, menor es la cantidad de pruebas con casos falsos positivos y falsos negativos disminuyendo así la necesidad de realizar amniocentesis.

Esta prueba es realizada actualmente en el primer y segundo trimestre de gestación siendo más efectiva y más común su realización en el segundo trimestre debido a los cambios químicos en la sangre materna son más pronunciados después de la semana 11. Los marcadores químicos a medir son los siguientes:

Alfa-fetoproteína (AFP) es una proteína producida por el feto en el hígado y en el saco amniótico. Esta proteína se incrementa hasta la semana 12 de gestación para luego disminuir hasta que el bebe nace. Como la madre y el feto están ligados a través de la placenta, esta proteína puede cruzar a la madre y aparecer en su sangre. Una elevada cantidad de AFP en la sangre materna puede indicar que el feto padece de un problema médico. Pruebas para medir los niveles de la AFP son realizados para determinar la presencia de trisomía 18 o 21 como parte del triple test o para detectar defectos de tubo neural.

La Gonadotropina coriónica humana (hCG) es una hormona producida durante el embarazo por el embrión inmediatamente luego de la implantación. Muchos de los test miden la presencia de β como subunidad de hCG, de manera que los niveles no se confunden con otras hormonas similares como lo son la hormona luteinizante y la luteoestimulante. En las pruebas sanguíneas, la β hCG puede ser detectada y casi siempre indican embarazo. Una baja presencia de esta hormona puede indicar existencia de trisomía 18 mientras que una alta concentración de la misma, la presencia de trisomía 21.

Estríol unconjugado (uE3) es un estrógeno encontrado principalmente en la placenta durante el embarazo. Ésta puede ser medida cuando la hormona pasa de la placenta a la sangre de la madre. Cuando los niveles de esta hormona son muy bajos, indican la presencia de trisomía 21 y 18.

Tabla 1. Patrón de análisis de los indicadores químicos de un cribado prenatal del segundo trimestre de gestación

Riesgo para:	AFP	UE3	hCG
Síndrome de Down	Bajo	Bajo	Elevado
Síndrome de Edward	Bajo	Bajo	Bajo
Espina Bífida	Elevado	Normal	Normal
Anencefalia	Elevado	Bajo	Normal

Luego que el cribado es realizado los resultados son comparados con los múltiplos de las medianas establecidos para una región específica. Cuando estos valores exceden los límites y las combinaciones de estos marcadores concuerdan con la tabla anterior, el *test* se considera positivo.

Para que una prueba sea considerada significativa, ésta debe de alcanzar una tasa de detección (detection rate DR) mayor al 75% y 3 de falsos positivos, porcentajes establecidos por el Comité Nacional de Cribado Prenatal en el 2008. Para que el cribado de trisomía 21 sea considerado preciso, variable como el peso de la madre, su etnia y la presencia de diabetes y hábitos como el fumar deben ser tomados en cuenta ya que estos afectan la exactitud del test. La siguiente ecuación muestra el calculo de la MoM para cada marcador:

$$MoM = \frac{\text{Resultado de la prueba del paciente}}{\text{Mediana del marcador para la semana de gestación}} \quad (1)$$

Por ejemplo: Si un paciente tiene un β hCG de 80,456 y la media de la población en esa semana de gestación es de 28,734 la MoM del paciente es 2.8, más del doble de la media de la población. Por ende, al paciente se le debe hacer un test físico para determinar la presencia de trisomía 21.

2.2. Clasificador Bayesiano Ingenuo

El clasificador bayesiano ingenuo(NB) es un clasificador probabilístico utilizado en el aprendizaje de máquinas el cual utiliza el teorema de Bayes pero con la característica de asumir independencia entre las variables involucradas. Es decir, las variables no tienen dependencia una con la otra al momento de realizar la clasificación de los datos. NB necesita para su parametrización, un grupo de data previamente clasificada, al cual se le denominará grupo de entrenamiento. Este conjunto de datos es analizado y procesado para la creación de un algoritmo llamado modelo. Este modelo posteriormente, es el que recibirá data no clasificada para clasificarla en base a las reglas del modelo clasificador. En la mayoría de los casos, las reglas son una variante del teorema de Bayes en el cual cada variable es mutuamente independiente de la otra, simplificando el proceso al momento de calcular las probabilidades de cada clase.

Entre algunas de las ventajas de utilizar NB podemos mencionar que este método es relativamente fácil de implementar y provee una buena exactitud en la mayoría de los casos incluso cuando el conjunto de datos de entrenamiento utilizado sea pequeño.

Entre algunas de las desventajas podemos mencionar el hecho de que si existe dependencia entre las características analizadas, esto puede afectar la

clasificación de los datos. Es importante verificar el conjunto de datos si existe dependencia.

2.3. Máquinas de Vectores de Soporte

Las máquinas de vectores de soporte (Support Vector Machine-SVM) [3] son una familia de máquinas de aprendizaje como los clasificadores bayesianos ingenuos. Estos necesitan un conjunto de datos de entrenamiento para poder generar un modelo que permita clasificar los datos en una u otra categoría. A diferencia de NB, las máquinas de vectores de soporte son clasificadores no probabilísticos ya que estos clasifican en base a posición de la data en un plano vectorial mas no así con modelos de grupos probabilísticos.

Dado un conjunto i de características, el modelo funciona en i dimensiones de espacio vectorial. Un vector, en este contexto, puede ser considerado un dato que posee i tipos de valores mas el valor de la clase, como en una lista $\vec{d} = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_i, v_C)$. Basado en un conjunto de datos, SVM calcula los hiperplanos, siendo estos un número menor en cantidad que el número de características a evaluar, para poder clasificar las clases. Estos hiperplanos deben alcanzar la mayor cobertura posible para ser precisos al momento de separar los datos. En los márgenes de estos hiperplanos residen los vectores de soporte, los cuales se encuentran en los bordes de los grupos de clases. En la figura uno podemos apreciar un ejemplo de un hiperplano. Usualmente, los hiperplanos son calculados con márgenes poco sensibles [3] donde algunos datos no son tomados en consideración para poder dibujar un hiperplano en base a la mediana de los grupos. Esto se da más que todo cuando los datos son linealmente separables. Sin embargo, cuando no lo son, SVM usa la funciones kernel para transformar el vector de espacio para hacerlo más linealmente separable y calcular los hiperplanos.

La inteligencia artificial está siendo fuertemente utilizada para la clasificación de registros médicos. Por ejemplo en [4] se utilizan las redes neuronales artificiales para estimar el riesgo de una aneuploidía trabajando con 9 variable y 51,208 ejemplos de entrenamiento y 16,898 muestreos de prueba. Otros casos como en [5], la información del Kinect es utilizada con SVM para detectar cuándo es más probable que una persona de tercera edad tenga una

caída midiendo sus pasos y analizado los cambios en su postura de estar sentado a estar de pie y viceversa. En [6], el clasificador predice la aparición de cáncer de pulmón con un 95.7% de exactitud; en [7] y [8] se obtuvo un 69% y 97.37% de exactitud respectivamente al medir el concepto de la calidad de vida de los pacientes utilizando cuestionarios para conocer sus opiniones. En [9] los electrocardiogramas son clasificados para detectar ritmos cardiacos anormales con una precisión del 98.4%; en [10] se procede a clasificar la comida utilizando cámaras para automatizar el cálculo del consumo alimenticio diario del paciente con un 92.23% de exactitud en base a color, textura, tamaño y forma de la comida; en [11] la incidencia de malaria en Mozambique es calculada con una desviación estándar de error 0.0032669 en las pruebas; en [12] se implementa un modelo de predicción par ayudar a identificar grupos de pacientes (HRQoL) que requieren intervención con un porcentaje de exactitud de 93%; en [13] un modelo de identificación automática para el estatus de pacientes fumadores de un sistema de registro electrónico no estructurado es desarrollado, con un F1 de 83.66%; en [14] los datos de un sistema de registro electrónico son clasificados para detectar trombo embolismo venoso, alcanzando un área bajo la curva de 98%; [15] propone un modelo de clasificación de abreviaciones ambiguas en notas 94.97% de exactitud; y en otros como en [16], un grupo de SVM con el método de agrupamiento conocido como k-Means Clustering y algoritmos genéticos son utilizados para diagnosticar diabetes en mujeres embarazadas con una exactitud 98.82%. Cada uno de los trabajos aquí mencionados son ejemplos de la utilización de máquinas de aprendizaje automático utilizadas dentro del contexto de salud.

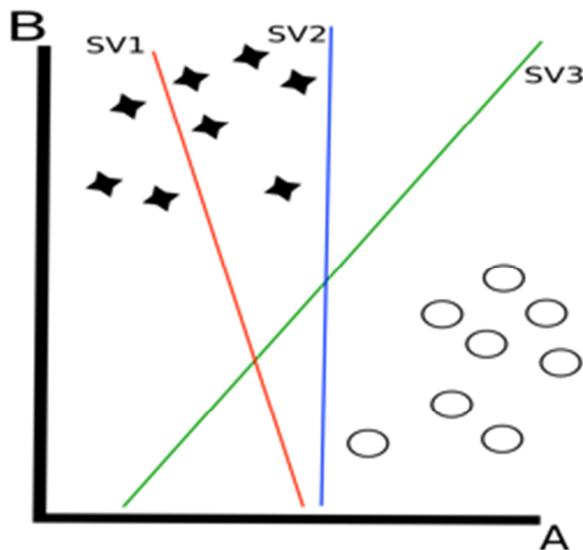


Figura 1. Representación de los hiperplanos (SV1, SV2, SV3) calculados por una máquina de vector de soporte. SV1 no separa las clases, SV2 las separa pero con un pequeño margen, mientras que SV3 los separa con la más amplia brecha posible entre las clases.

Entre algunas de las ventajas que podemos mencionar sobre la clasificación de los datos mediante este método [17] están el hecho de que con los Kernels, SVM nos proporciona flexibilidad para elegir crear un margen más estricto o uno más flexible por medio de parámetros. También que SVM provee una buena generalización para el conjunto de datos de prueba; si los parámetros Costos (C) y los gamma (γ) son definidos correctamente para la función radial gaussiana, el modelo se mantiene robusto aun cuando el conjunto de datos de prueba tenga un sesgo relativo.

SVM provee una solución única para todo el conjunto de datos y adicional eligiendo el Kernel apropiado, como lo es el kernel gaussiano, mayor efecto puede aplicarse en las similitudes de los pruebas de ejemplo.

Entre algunas de las desventajas podemos mencionar el hecho de que SVM requiere un mayor poder computacional en comparación a otras técnicas para ejecutar los cálculos, y este requerimiento se incrementa a medida que el conjunto de datos es mayor. La afinación y la elección del Kernel debe ser preciso para lograr obtener una mejor aproximación.

3. Objetivos del proyecto

El principal objetivo de este proyecto es el de proponer un modelo que permita clasificar de una manera dinámica, mediante la utilización de métodos de inteligencia artificial como las máquinas de vectores de soporte y clasificador bayesiano ingenuo, la existencia o no de la trisomía 21, pronosticando la presencia del síndrome de Down dinámicamente, en base a parámetros poblacionales de nuestro país. A continuación, se explica el proceso del análisis desarrollado en esta investigación.

3.1. Desarrollo de los Modelos de Máquinas de Aprendizaje Automático

El modelo está compuesto por dos componentes de estimación, el primer modelo esta basado en el método conocido como clasificador bayesiano ingenuo mientras que el segundo utiliza máquinas de vectores de soporte. Estos modelos tomarán los valores de entrada proveniente de los laboratorios médicos del paciente y pronosticarán la existencia de la enfermedad. Los datos están compuestos de 4 variables: α -Fetoproteína (AFP), Estriol no conjugado(UE3), β -Humana Gonadotropina Coriónicas (BHCG) y la variable a clasificar. La clasificación separa a los individuos en 2 clases: Normal, en el cual las muestras presentan una condición estable y la anormal, donde los múltiplos de las medianas de los marcadores químicos presentan un rango fuera de lo establecido como normal. La condición anormal, en este caso, hará referencia a la presencia de trisomía 21 o síndrome de Down, ya que este clasificador puede aplicarse a otras enfermedades también estimadas mediante las pruebas de cribados prenatales, como lo son la trisomía 18 o síndrome de Edward, espina bífida y preeclampsia. Estas condiciones son agrupadas dentro de la clasificación anormal.

3.2. Modelo de Detección Bayesiano Ingenuo

Para desarrollar el componente con NB, primero calculamos el promedio de cada característica mediante la ecuación 2:

$$\mu_{F_i C_j} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p v_k \quad (2)$$

Donde $\mu_{F_i C_j}$ es el promedio de la característica F_i de la clase C_j con una población de p con un valor de v .

Luego se procede a calcular la varianza para cada característica de cada clase aplicando la ecuación 3:

$$\sigma_{F_i C_j}^2 = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p (v_k - \mu_{F_i C_j})^2 \quad (3)$$

Donde $\sigma_{F_i C_j}^2$ es la varianza de la característica F_i de la clase C_j . La probabilidad de una clase C_j en una población es obtenida mediante la ecuación 4:

$$p(C_j) = \frac{\sum C_j}{p} \quad (4)$$

La probabilidad de la clase C_j es la suma de todas los casos u ocurrencias de esa clase dividido entre la población. Una vez realizado esto, el siguiente paso consiste en calcular la probabilidad de la característica F_i dada la clase C_j . Como en este caso el valor de los datos son continuos, la distribución normal es usada para la probabilidad del modelo.

$$p(F_i | C_j) = \frac{e^{-\frac{(v - \mu_{F_i C_j})^2}{2\sigma_{F_i C_j}^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma_{F_i C_j}^2}} \quad (5)$$

Una vez todas las probabilidades de $p(F_i | C_j)$ son calculadas, se procederá a calcular la probabilidad de cada funcionalidad:

$$p(F_1, F_2, \dots, F_i) = \sum_{k=1}^j \left(p(C_k) \prod_{l=1}^i p(F_l | C_k) \right) \quad (6)$$

El último paso pudiera ser omitido ya que no es fundamental para hacer la clasificación porque no afecta la probabilidad del resultado. La asunción ingenua aplica:

$$p(F_i | C_j, F_k) = p(F_i | C_j) \quad (7)$$

$$p(F_i | C_j, F_k, F_l) = p(F_i | C_j)$$

$$p(F_i | C_j, F_k, F_l, F_m) = p(F_i | C_j)$$

ya que la característica F_i es independiente de las otras características F_k, F_l, F_m, \dots donde $i \neq k, l, m, \dots$, este hace más fácil de calcular las posibilidades de F_i . La probabilidad de la clase en base a dicha característica se calcularía 5:

$$p(C_j | F_1, F_2, \dots, F_i) = \frac{1}{p(F_1, F_2, \dots, F_i)} p(C_j) \prod_{k=1}^i p(F_k | C_j) \quad (8)$$

Luego que todas las probabilidades para cada clase son calculadas, el último paso es evaluar que clase tiene la mayor probabilidad de ocurrencia. Esto es realizado mediante la regla de decisión máximo a posteriori.

$$\hat{p} = \underset{j \in \{1, \dots, J\}}{\operatorname{argmax}} p(C_j) \prod_{k=1}^i p(F_k | C_j) \quad (9)$$

3.3. Modelo de máquina de soporte de estado

La implementación de este componente se llevó a cabo utilizando el lenguaje de programación R. Se utilizó el paquete e1071 [18] el cual es una implementación del paquete libsvm (21) los cuales generan modelos para SVM. Este paquete o librería de R presenta las siguientes características

- Clasificación C y v
- Regresión v y ε
- Métodos de Kernel incluidos: lineal, poli nominal, sigmoidal and funciones de base radial.

El modelo utilizado para la prueba implementa una clasificación C con funciones radiales Gaussianas. Este modelo es fácil de configurar utilizando dos parámetros y provee generalmente un buen desempeño. Los dos parámetros son costo (C) y gamma (γ). El costo es el parámetro para el método de clasificación C el cual le dice al modelo cuan rígido o flexible será el vector de soporte. Cuando el conjunto de datos de entrenamiento presente ruido, el modelo puede omitir algunos datos para poder proveer hiperplanos más anchos que el promedio de las clases, haciendo que el

Tabla 2. Comparación de resultados entre Naive Bayes y Support Vector Machine

	Naive Bayes	SVM $\gamma = 0.01$	SVM $\gamma = 0.1$	SVM $\gamma = 1$	SVM $\gamma = 10$	SVM $\gamma = 100$
Exactitud	50.00%	75.00%	80.00%	95.00%	95.00%	95.00%
Precisión	33.33%	75.00%	100%	87.50%	100%	100%
Sensibilidad	42.86%	42.86%	42.86%	100%	85.71%	85.71%
MCC	-0.032	0.419	0.572	0.899	0.892	0.892

modelo sea más preciso en la clasificación de datos desconocidos.

Gamma es el parámetro de la función radial gaussiana del kernel el cual puede ser asignado libremente. Éste parámetro determina cuan ancho, o plano, es la distribución de la clase. Mientras más bajo sea el parámetro gama, más plana y angosta se convierte la distribución.

Para poder preparar el componente SVM del modelo, el conjunto de datos de entrenamiento y de prueba son cargados en R leyendo un archivo de valores separados por coma mediante la utilización del siguiente comando:

```
library(e1071)
trainset <- read.csv('train_set.csv', head = FALSE)
testset <- read.csv('test_set.csv', head = FALSE)
```

Figura 2. Asignación de datos.

La primera línea carga la librería e1071. La segunda y tercera línea cargan los archivos que contienen el conjunto de datos de entrenamiento y de prueba. Una vez esto es realizado, procedemos a crear el modelo con el siguiente comando:

```
modelo <- svm(V4., data = trainset,
kernel = "radial", gamma = g, cost = c)
```

Figura 3. Cargando modelos.

Aquí, V4 es la columna con las variables (la cuarta columna). Los valores de γ y C pueden ser calculados mediante prueba y error donde quiera se ajuste al conjunto de datos de prueba: en todas las pruebas, el valor del costo es 100. Para la predicción, las siguientes instrucciones son necesarias:

```
prediction <- predict(model, testset[,-4]) tab <-
table(pred = prediction, true = testset[,4])
```

Figura 4. Corriendo el modelo.

La variable de predicción almacena el valor que es predicho con el modelo y el conjunto de datos de prueba, donde la cuarta columna es removida para establecer las clases. Luego la variable tab almacena la matriz de confusión de la predicción (asignada como "pred") y el conjunto de datos de entrenamiento (asignado a "true").

4. Resultados

Luego que el modelo es creado e implementado, se tomaron 100 muestras médicas seleccionadas al azar por especialistas en cribado prenatal, sin incluir ningún dato que pudiera identificar al paciente de la muestra, para mantener la privacidad de los mismos. Estos datos de prueba fueron insertados en ambos componentes, tanto el de NB como el de SVM.

NB y SVM fueron comparados y analizados tomando en cuenta su exactitud, precisión, sensibilidad y coeficiente de correlación de Matthew. Exactitud es la medida que indica cuan cerca los resultados están del valor esperado. Precisión mide cuan distribuido los

resultados están de ellos mismos. Mientras más cerca está el valor estimado del verdadero valor, más alta es la exactitud y más cercanos se encuentran los resultados entre sí, mayor es la precisión. Se espera que los resultados muestren una buena exactitud y precisión para poder obtener un test congruente.

Sensibilidad es la porción de los test verdaderos positivos versus todos los resultados realmente positivos. Se calcula mediante la suma de los test verdaderos positivos y falsos negativos.

El coeficiente de correlación de Matthew (MCC) mide que tan bien se comporta un clasificador en una tarea de clasificación entre variables de dos clases[19] sin importar el tamaño de la muestra o la población. Mientras el índice MCC es más cercano a 1, mejor es la clasificación. Un índice de 0 significa que no existe diferencia entre la predicción realizada mediante el clasificador y una predicción aleatoria. Un índice de -1 indica que la predicción es totalmente opuesta a los resultados reales.

Los resultados fueron calculados con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (10)$$

$$\text{Presicion} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (11)$$

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (12)$$

$$\text{MCC} = \frac{TP \times TN - FP \times FN}{\sqrt{(TN+FP)(TP+FN)(TN+FN)(TP+FP)}} \quad (13)$$

En ambos modelos se utilizó como entrada el mismo conjunto de entrenamiento de 84 muestras y conjunto de pruebas de 20 muestras y los resultados pueden ser observados en la tabla número dos, siendo la primera columna los resultados de NB y las siguientes SVM bajo distintos niveles de restricción.

NB obtuvo una precisión menor al realizar la clasificación. SVM obtuvo una exactitud mínima del 75% con un MCC de 0.419 y una exactitud de 95% con MCC de 0.899 respectivamente.

SVM arrojó según lo comparado mejores resultados que NB. Sin embargo, debemos tomar en consideración que el tamaño de la muestra que se utilizó como conjunto de datos de entrenamiento y de prueba tienen influencia sobre el resultado de NB, ya que el mismo

utiliza el método de probabilidad entre las clases. A diferencia de NB, SVN genera el modelo con los parámetros establecidos por lo que los datos de entrada son clasificados en base a su posición en el hiperplano donde ellos residen.

5. Discusión

Mediante ambos componentes, se está logrando clasificar el resultado de los pacientes dentro de un rango normal o anormal, de una manera dinámica basándonos en muestreos previamente realizados, sin la necesidad de establecer límites inferiores y superiores estáticos para indicar el rango que determina o no la presencia de una enfermedad en una población.

Los resultados obtenidos pueden ser mejorados, ya que el número de muestras seleccionadas para realizar las pruebas debió ser mayor, pero la disponibilidad de los mismos es una limitante actual. Adicional, el conjunto de datos de entrenamiento fue seleccionado del muestreo y probablemente no es el mejor. Para poder obtener resultados más precisos, debemos contar con el apoyo de instituciones y especialistas que nos proporcionen un muestreo mucho mayor y seleccionen más cuidadosamente un conjunto de datos de entrenamiento más sensitivo.

Basado en estos resultados, por el momento podemos argumentar que SVM aplicado en paralelo con los métodos actuales de predicción, puede mejorar la estimación del riesgo de padecer el síndrome de Down propuesta en [1], donde se agrega una variable adicional de geolocalización (variable aún no tomada en cuenta en el proceso de estimación) y un modelo estándar para el compartimiento de la información entre instituciones de salud para obtener un muestreo mayor de datos.

Además, este trabajo continua con datos experimentales proporcionados por otros laboratorios en la provincia de Chiriquí, Panamá. En ésta etapa del proyecto, se requiere de mayor cantidad de datos de muestra para poder analizar, validar y certificar con certeza el funcionamiento del modelo. A medida que los componentes se utilicen por los laboratorios, el número de datos de muestras aumentará, por lo que será posible ser cada vez más acertado en la clasificación y predicción basados en los propios parámetros de la población.

6. Conclusiones

- Las máquinas de soporte de estado y el clasificador bayesiano ingenuo son métodos de aprendizaje automático de máquinas, los cuales siendo bien implementados ayudan a los especialistas en la salud a tomar mejores decisiones basados en sus experiencias.
- La implementación del modelo utilizando NB y SVM mostró resultados aceptables. Pero, sabemos que la calidad de la muestra no es la mejor y el tamaño de la data de muestra es pequeño. Si el mismo modelo es aplicado bajo mejores condiciones, pruebas propuestas para trabajos futuros donde se cuente con mayor cantidad de recursos, los resultados tendrán mayor exactitud y precisión en la predicción.
- El contar con un conjunto de datos adecuado es un factor importante independientemente del método de clasificación utilizado, porque los algoritmos dependen de un conjunto de datos de entrenamiento para poder crear el modelo que posteriormente clasificará la data. Este argumento tiene mayor ponderación en algunos métodos de clasificación que en otros.
- Mientras se levantaba el estado del arte sobre la utilización de métodos de aprendizaje automático en el campo de la salud y al haberlos aplicados en nuestros modelo, no podemos argumentar que un método es mejor que otro ya que la clasificación dependerá de la naturaleza de las características de los datos a clasificar, de la relación entre las características y el tipo de datos a ser clasificado.
- Con este proyecto intentamos mejorar el proceso actual de estimación del síndrome de Down permitiendo así a los médicos proporcionar a sus pacientes un más adecuado y temprano tratamiento para lograr un proceso de parto menos riesgoso y disminuir el uso de métodos invasivos como la amniocentesis los cuales ponen en riesgo al feto.

7. Referencias

- [1] J. Saldaña and M. Vargas-Lombardo, "eHealth Management Platform for Screening and Prediction of Down's Syndrome in the Republic of Panama," *E-Health Telecommun. Syst. Networks*, vol. 03, no. 03, pp. 33–42, Sep. 2014.
- [2] D. Patterson, "Molecular genetic analysis of Down syndrome," *Hum. Genet.*, vol. 126, no. 1, pp. 195–214, Jul. 2009.
- [3] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Mach. Learn.*, vol. 20, no. 3, pp. 273–297, 1995.
- [4] A. Neocleous, K. Nicolaides, and C. Schizas, "First Trimester Non-invasive Prenatal Diagnosis: A Computational Intelligence Approach," *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, pp. 1–1, 2015.
- [5] M. Parajuli, D. Sharma, D. Tran, and W. Ma, "Senior health monitoring using Kinect," *Commun. Electron. (ICCE), 2012 Fourth Int. Conf.*, pp. 309–312, 2012.
- [6] L. G. Ahmad, A. T. Eshlaghy, A. Poorebrahimi, M. Ebrahimi, and A. R. Razavi, "Using Three Machine Learning Techniques for Predicting Breast Cancer Recurrence," *J. Heal. Med. Informatics*, vol. 04, no. 02, pp. 1–3, 2013.
- [7] C.-K. Chen, M. Bruce, L. Tyler, C. Brown, A. Garrett, S. Goggins, B. Lewis-Polite, M. L. Weriwoh, P. D. Juarez, D. B. Hood, T. Skelton, and D. B. Hood, "Analysis of an Environmental Exposure Health Questionnaire in a Metropolitan Minority Population Utilizing Logistic Regression and Support Vector Machines," *J. Health Care Poor Underserved*, vol. 24, no. 1A, pp. 153–171, 2013.
- [8] S. Kumar, M. L. Rana, K. Verma, N. Singh, A. K. Sharma, A. K. Maria, G. S. Dhaliwal, H. K. Khaira, and S. Saini, "PrediQt-Cx: post treatment health related quality of life prediction model for cervical cancer patients.," *PLoS One*, vol. 9, no. 2, p. e89851, 2014.
- [9] R. J. Martis, U. R. Acharya, L. C. Min, K. M. Mandana, a K. Ray, and C. Chakraborty, "Application of higher order cumulant features for cardiac health diagnosis using ECG signals," *Int. J. Neural Syst.*, vol. 23, no. 4, p. 1350014, 2013.
- [10] P. Pouladzadeh, S. Shirmohammadi, and T. Arici, "Intelligent SVM based food intake measurement system," *2013 IEEE Int. Conf. Comput. Intell. Virtual Environ. Meas. Syst. Appl. CIVEMSA 2013 - Proc.*, pp. 87–92, 2013.
- [11] O. P. Zacarias and H. Bostr, "Comparing Support Vector Regression and Random Forests for Predicting Malaria Incidence in Mozambique," no. January 2016, pp. 217–221, 2013.
- [12] S.-K. Lee, Y.-J. Son, J. Kim, H.-G. Kim, J.-I. Lee, B.-Y. Kang, H.-S. Cho, and S. Lee, "Prediction Model for Health-Related Quality of Life of Elderly with Chronic Diseases using Machine Learning Techniques.," *Healthc. Inform. Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 125–34, 2014.
- [13] J. Jonnagaddala, H. Dai, and P. Ray, "A preliminary study on automatic identification of patient smoking status in unstructured electronic health records," no. BioNLP, pp. 147–151, 2015.
- [14] C. M. Rochefort, A. D. Verma, T. Eguale, T. C. Lee, and D. L. Buckeridge, "A novel method of adverse event detection can accurately identify venous thromboembolisms (VTEs) from narrative electronic health record data.," *J. Am. Med. Inform. Assoc.*, vol. 22, no. 1, pp. 155–65, 2015.
- [15] Y. Wu, J. Xu, Y. Zhang, and H. Xu, "Clinical Abbreviation Disambiguation Using Neural Word Embeddings," no. BioNLP, pp. 171–176, 2015.

- [16] T. Santhanam and M. S. Padmavathi, "Application of K-Means and Genetic Algorithms for Dimension Reduction by Integrating SVM for Diabetes Diagnosis," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 47, pp. 76–83, 2015.
- [17] L. Auria and R. A. Moro, "Support vector machines (SVM) as a technique for solvency analysis," 2008.
- [18] D. Meyer and F. H. T. Wien, "Support vector machines," *Interface to libsvm Packag. e1071*, 2015.
- [19] B. W. Matthews, "Comparison of the predicted and observed secondary structure of {T4} phage lysozyme," *Biochim. Biophys. Acta - Protein Struct.*, vol. 405, no. 2, pp. 442–451, 1975.

Caracterización y Análisis de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en los sedimentos marinos de la Bahía Manzanillo y su influencia en los procesos de biodegradación

Characterization and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in marine sediments of Manzanillo Bay and influence biodegradation processes

Ariel Antonio Grey G.¹, Viccelda Domínguez de Franco²
^{1,2} Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá
¹ ariel.grey@utp.ac.pa, ² viccelda.dominguez@utp.ac.pa

Resumen— Se realizó un estudio para caracterizar y analizar la presencia de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) en sedimentos en la Bahía de Manzanillo y determinar su influencia en los procesos de biodegradación. Se identificaron cinco estaciones. Se determinó la textura de los sedimentos, el contenido de materia orgánica, y adicional el Potencial de Hidrógeno (pH), la temperatura, coliforme totales y E. Coli además de conocer su influencia sobre la biodegradación en la zona. En todas las estaciones se presentó más del 80% de limo arcilloso. La concentración de materia orgánica osciló entre 8% a 32%, mientras que los valores de pH oscilaron en su mayoría a valores desde neutros hasta ligeramente alcalinos (7.0 – 7.8). La temperatura de los sedimentos varió entre 22.6 a 25.2 °C, los valores en sedimento de Escherichia coli, y coliformes totales fueron menores a 1 NMP. Se determinó la presencia de fenantreno, 73 mg/L y también naftaleno, 66 mg/L. Las tendencias observadas tanto en tamaño de sedimento y el contenido de materia orgánica sugieren un ambiente muy favorable para la afinidad de los compuestos orgánicos como los HAP, siendo favorables tanto para la actividad de tolerancia de algunas bacterias y el consumo de hidrocarburos para otras. Se recomienda el monitoreo de HAP en agua, sedimentos y en efluentes como una metodología adecuada para asegurar la calidad del entorno y así establecer parámetros de control y normativas para el monitoreo de las zonas costeras.

Palabras claves— Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos, sedimentos, biodegradación, compuestos orgánicos, monitoreo, zonas costeras.

Abstract— A study was conducted to characterize and analyze the presence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in sediments of Manzanillo Bay in order to determine their influence on the biodegradation processes. A total of five study stations were identified. The study determined the texture of the sediment, organic content, Hydrogen Potential (pH), temperature, total coliforms and E. coli to evaluate their influence on the biodegradation process of the area. All the study areas were composed of more than 80 % silty clay. The organic content concentration ranged from 8% to 32 % while pH values ranged mostly from neutral to slightly alkaline (7.0 - 7.8). The temperature of the sediments varied between 22.6 °C to 25.2 °C, the Escherichia Coli and total Coliforms values found on the sediments were less than 1 NMP. The presence of phenanthrene was identified, 73 mg / L naphthalene and 66 mg / L. The trends observed in both, size and sediment organic content, suggest a favorable environment to the affinity of organic compounds such as PAHs which represents an advantage for the tolerance activity of some bacteria and the consumption of hydrocarbons for others. Monitoring the PAH in water, effluent sediments as well as an appropriate methodology for the quality assurance of the environment are also recommended in order to establish control parameters and standards for monitoring coastal areas.

Keywords— Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, sediment biodegradation, organic compounds, monitoring coastal areas.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 17 de febrero de 2016

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

1. Introducción

En los ecosistemas acuáticos, los sedimentos juegan un papel importante en la degradación de la materia orgánica y el reciclamiento de los nutrientes [1]. Otros estudios concluyen que en los sedimentos marinos costeros la penetración de oxígeno y los procesos de descomposición aeróbicos están limitados a unos pocos milímetros de la capa superficial, y por debajo de esta zona óxica la descomposición de la materia orgánica ocurre por medio de una gran variedad de procesos anaeróbicos [2,3].

La determinación de hidrocarburos es de gran importancia para las entidades ambientales, debido a los deterioros que causan estos al ambiente. Entre los múltiples factores que afectan el ambiente están los derramamientos, vertimientos de residuos industriales en ríos, mares y otras fuentes [4]. La presencia de aceites y grasas en aguas residuales domésticas e industriales es de interés público debido tanto a su efecto perjudicial en lo estético, como al impacto negativo que provoca en la vida acuática. Parámetros reglamentarios y normativos se han establecido para su monitoreo en agua y en efluentes, los cuales requieren una adecuada metodología para asegurar la calidad analítica de los resultados [5,6].

Los procesos físicos, químicos y biológicos contribuyen considerablemente al destino de los hidrocarburos cuando se derraman o vierten en áreas costeras. Después de una rápida evaporación y de la pérdida de las fracciones ligeras, en su mayor parte el hidrocarburo permanece en la columna de agua o en sedimentos, sujeto a degradación microbiana y a otros procesos, en general lentos. Por consecuencia, y con la ayuda de procesos sedimentarios, casi todos los hidrocarburos tienen como destino final los sedimentos. Este fenómeno es más agudo en los estuarios y otras áreas someras, donde es baja la acción de las olas y, en cambio, es alta la tasa de sedimentación [7].

Dieciséis Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) son considerados como contaminantes prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comunidad Económica Europea (CEE) debido a sus efectos carcinógenos [8], motivo por el cual se toman como referencias para este estudio tres HAP de bajo,

medio y mayor peso molecular; los mismos son el Naftaleno (128, 18 g/mol), Fenantreno (178,23 g/mol) y Pireno (202,26 g/mol).

Debido a su naturaleza hidrofóbica, los HAP en los ecosistemas terrestres y acuáticos se encuentran en suelos y sedimentos, por lo que presentan una baja solubilidad biológica y por lo tanto son bioacumulados en la cadena alimentaria [8]. La exposición a los HAP está asociada con diferentes efectos que incluyen toxicidad cardiovascular, efectos negativos sobre la reproducción y la médula ósea, supresión del sistema inmune o toxicidad en el hígado; no obstante, el efecto tóxico más importante resultado de la exposición a los HAP es el cáncer por lo que el interés científico sobre la presencia de estas sustancias en matrices ambientales ha crecido [6,7]. Recientemente, se ha demostrado que la compleja especiación de estas sustancias entre los diferentes compartimentos existentes en la columna de agua de fuentes de aguas superficiales como ríos, lagos y escenarios costeros se relaciona con su capacidad para penetrar las membranas de organismos vivos y ocasionar efectos tóxicos [7,8].

Esta investigación busca determinar la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos en los sedimentos marinos de la Bahía Manzanillo y analizar su influencia en los procesos de biodegradación.

2. Materiales y métodos

Se consideraron cinco estaciones de estudio, se consideraron tres áreas y se ubicaron cinco puntos o estaciones de estudios comprendido entre 9°21'26.76"N y 79°53'7.47"W hasta los 9°21'51.54"N y 79°53'27.00"W representativos mediante el empleo de un geoposicionador portátil (GPS); se registró la altitud, latitud y longitud de cada punto; su ubicación se muestra en la figura 1. El Datum utilizado fue el WGS84.

Área 1: frente a la ciudad de Colón, donde se ubicó un punto o estación (1) a lo largo de la línea de costa entre el muelle de embarcaciones de recreo y operativas del Club Náutico Caribe y el Muelle de Cruceros de Home Port Colón. Es un sitio con presencia de actividades industriales. Área 2: frente a la ciudad de Colón, donde se ubicó un punto o estación (2), considerando puntos de referencia como el muelle de Cruceros Colón 2000 y el Home Port Colón. Sitio mayormente ocupado por residencias y de gran actividad comercial. Área 3: frente a las terminales portuarias de Colon Ports Terminal, Manzanillo

International Terminal y Colón Container Terminal y las aguas provenientes del Río Folks. Sitio mayormente afectado por el tránsito de buques y sitios de actividades portuarias. Ahí se ubicaron tres puntos o estaciones (3, 4 y 5).

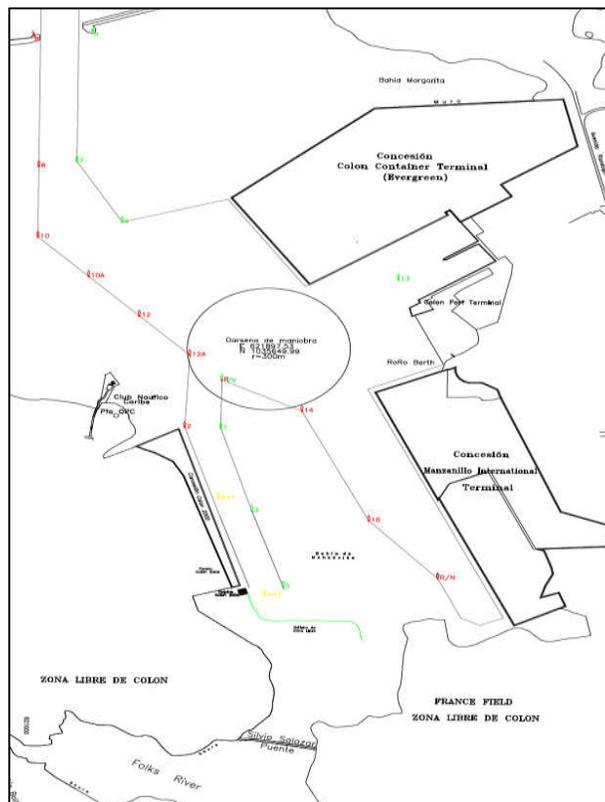


Figura 1. Localización área de estudios y estaciones de muestreo.

El material sólido fresco se preservó en botellas ámbar y se refrigeró a 4 °C hasta su análisis. La porción de sedimento para los análisis geoquímicos se secó por 72 horas a 20 °C. Mientras que la textura de los sedimentos se determinó según el triángulo de Sheppard [9]. El contenido de materia orgánica en el sedimento se estableció como porcentaje de materia orgánica en el peso seco del mismo [10]. En el caso de los sedimentos marinos, los contenidos de materia orgánica varían entre 0,5% y 10%. En la tabla 1 se presenta los valores relativos de porcentaje de materia orgánica.

Para extraer los hidrocarburos se utiliza el método de reflujos con equipo Soxhlet, tomando como referencia los métodos D5369-93 de la ASTM y 3540C y 3541 de la US EPA [11, 12, 13].

Para la calibración del método espectrofotométrico se prepararon patrones a partir de una mezcla de hidrocarburos comerciales (Naftaleno, Fenantreno y Pireno) con una concentración del 99%.

Tabla 1. Valores relativos en porcentajes de materia orgánica

CATEGORIA	VALOR
Extremadamente pobre	< 0.6
Pobre	0.6 – 1.2
Pobre intermedio	1.3 – 1.8
Medio	1.9 – 2.4
Rico moderadamente	2.5 – 5.0
Rico	5.1 – 14.0
Extremadamente rico	> 14.0

El Potencial de Hidrógeno (pH) se determinó por el método electrométrico, utilizando un potenciómetro.

Adicional a los valores obtenidos de pH, se determinaron las variables de Temperatura, coliformes total y *Escherichia coli* de cada uno de los sitios analizados, para conocer su influencia sobre los procesos de degradación en la zona.

3. Resultados y discusión

La determinación de la textura de los sedimentos es primordial en los estudios de los sistemas acuáticos porque se ha demostrado que la adsorción de contaminantes orgánicos hidrofóbicos y metales se correlaciona con ambos [14].

Mediante el sistema ternario de Sheppard (figura 2), los sedimentos estudiados se pueden clasificar en arenosos, limosos y arcillosos. En ella, la mayoría de las muestras presentaron texturas del tipo limo arcilloso, en las Estaciones (E1, E2, E4, y E5), ya que los niveles de limo estuvieron superiores al 80% (tabla 1); y de textura arcillosa en las estaciones identificadas, las cuales presentaron niveles de arcilla mayores al 15% (tabla 2), a diferencia de la E3 (de referencia), la cual es de tipo limo, ya que presentó un valor de la fracción limo superior al 90% (tabla 1).

Las corrientes marinas, el aporte del Río Folks, las descargas de las aguas residuales como también el movimiento de los buques, pueden ser los factores más importantes que controlan las fracciones granulométricas de la Zona.

La distribución de las fracciones granulométricas, según Aguilera [15], están condicionada a factores como la topografía, velocidad y dirección de los vientos

y a las diversas corrientes generadas durante el régimen de pleamar y bajamar.

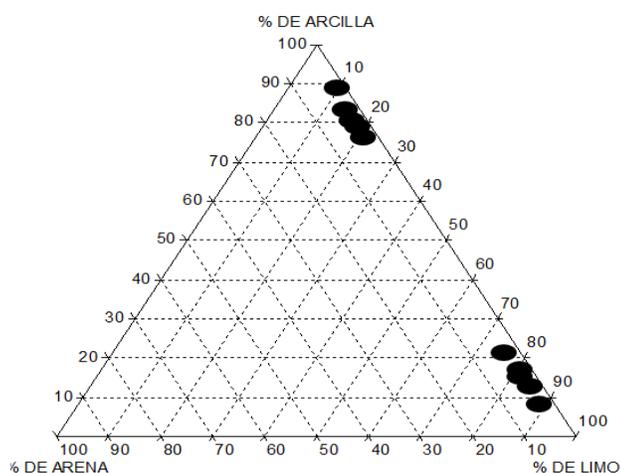


Figura 2. Distribución granulométrica de los sedimentos costeros de la Bahía de Manzanillo.

En su gran mayoría, todas las estaciones presentaron más del 80% de limo arcilloso. Únicamente en la estación 3 se encontró el 10% de limo (tabla 2).

Tabla 2. Porcentaje de las diferentes fracciones granulométricas obtenidas en los sedimentos superficiales de la Bahía de Manzanillo

Estación	%			Textura
	Arena	Limo	Arcilla	
1	0,00	80,00	20,00	Limo arcilloso
2	0,00	83,00	17,00	Limo arcilloso
3	0,00	90,00	10,00	Limo
4	0,00	83,00	17,00	Limo arcilloso
5	0,00	84,00	16,00	Limo arcilloso
Prom	0,00	84,00	16,00	-
Max	0,00	90,00	20,00	-
Min	0,00	83,00	16,00	-
δ	0,00	3.67	3.67	-

La fluctuación de los datos con respecto a su media es 3.67, donde indica que los valores se desvían a 3.57 de la media que aritmética que es 16,00.

La materia orgánica particulada representa la fuente más importante para el sedimento [10]. Otros estudios

han estimado que las partículas representan de un 20% al 40% en ambientes costeros [16].

La materia orgánica puede ser más abundante en sedimentos finos que en gruesos [17]; sin embargo, es mayor en sedimentos de limo y arcilla más que en arena. En el caso de la zona de estudio, Bahía de Manzanillo, predominan sedimentos limo arcilloso y solo cerca de la zona influenciada por el Río Folks predomina el Limo dónde se encontraron los valores más altos que corresponde a ambos periodos tanto lluvioso como seco [18].

Mientras mayor es el porcentaje de sedimentos finos mayor es su capacidad de adsorber sustancias orgánicas, como en este caso lo son los hidrocarburos, [19, 20, 21] como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de materia orgánica (como porcentaje del peso seco) en el sedimento de analizados en esta investigación

Estaciones	Materia orgánica (%)		Característica
	Seca	Lluviosa	
1	15	8	Rico/Extremadamente ricos
2	32	14	Extremadamente ricos
3	30	13	Extremadamente ricos
4	32	8	Rico/Extremadamente ricos
5	27	13	Extremadamente ricos

Cabe señalar que el contenido de materia orgánica es dinámico y pueden cambiar con base en la concentración en la columna de agua y en función de procesos de degradación bacteriana y por la actividad de los organismos bénticos.

Los valores de materia orgánica mostraron en esta ocasión mayor homogeneidad, y la tendencia a la disminución con la profundidad no fue tan evidente. La concentración de materia orgánica osciló entre 8% a 32%, correspondiendo en la época seca los valores más altos y a la época lluviosa los más bajos.

Estudios han demostrado que las concentraciones en los sedimentos marinos son normales cuando el porcentaje de materia orgánica oscila entre 0,1 y 10 [22].

Los valores de materia orgánica mostraron en esta ocasión mayor homogeneidad, y la tendencia a la disminución con la profundidad no fue tan evidente. La concentración de materia orgánica osciló entre 8% a

32%, correspondiendo en la época seca los valores más altos y a la época lluviosa los más bajos. En la Bahía de Manzanillo, los porcentajes de materia orgánica mayores de 27% se encontraron en las estaciones más profundas, que también fueron los que obtuvieron mayor cantidad de limo arcilloso lo que puede ser asociado a una acumulación debido a la suspensión de materiales autóctono producidos en las cercanías de esas áreas.

Estos sedimentos presentan un alto contenido de material orgánico, lo cual coincide con las mayores concentraciones de limos y arcillas, debido a la alta capacidad de adsorción de los sedimentos finos [15, 19].

Específicamente en la región costera, por las diversas actividades pesqueras, domésticas y las escorrentías continentales las cuales aportan todo tipo de materiales de desechos que una vez degradados, se sedimentan desde la columna de agua. Por otra parte, se indica que la concentración de materia orgánica está favorecida por el tipo de grano grueso y por el sistema de corriente presente en esta zona que permite la exportación de la materia orgánica fresca hacia otras regiones adyacentes.

Mientras tanto, se ha señalado que los sedimentos son considerados pobres cuando el porcentaje de material orgánico es menor a 0,5% [23]. De tal modo, los sedimentos de la Bahía de Manzanillo pueden ser considerados extremadamente ricos en material orgánico debido a que todos los valores reportados en este estudio son superiores a dicho valor, con un promedio de 27% en la estación seca y 11% en la estación lluviosa, ver tabla 2.

En todos los casos las mayores concentraciones de los indicadores de materia orgánica se localizan próximas a la desembocadura de los ríos y emisores de fuentes contaminantes o se relacionan con la mayor producción primaria estimulada por la concentración de nutrientes [24].

El pH se determinó por el método electrométrico, utilizando un potenciómetro. Se pesaron 5 g de muestra y se adicionaron 12.5 ml de agua.

El pH tiene poca importancia como valor propio en los sedimentos, sin embargo, puede tener un efecto significativo sobre la biota que habita en el fondo [25]. Se considera que el pH es estable en ambientes marinos y cuando es menor a 7 se tienen condiciones anoxicas [26]. La apariencia física del sedimento colectado en la

Bahía de Manzanillo era, de color gris oscuro en estado fresco, gris claro una vez seca y rojiza después de estar sometido a ignición, con un valor de pH 7.4 en el período lluvioso y 7.6 en el período seco (tabla 4).

Los valores de pH que se registraron correspondieron en su mayoría a valores desde neutro hasta ligeramente alcalinos (7.0 – 7.8), para la estación lluviosa y entre (7.4 – 8.2) para la estación seca (tabla 3). Las condiciones neutras o ligeramente alcalinas, son favorables en los procesos de biodegradación por bacterias, y especialmente beneficiosos cuando se habla de compuestos orgánicos de difícil degradación [27, 28, 29].

Tabla 4. Valores de pH, temperatura y coliformes en el sedimento de la Bahía en el Período Seco (a) y Lluvioso (b)

Período Seco (a)

Prueba	E1	E2	E3	E4	E5
pH	8.2	77.5	7.4	7.6	7.5
Temperatura (oC)	24.6	25.2	23.4	23.7	24
Coliformes Totales (NMP)	>1	>1	>1	1.37	>1
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	>1	>1	>1	>1	>1

Período Lluvioso (b)

Prueba	E1	E2	E3	E4	E5
pH	7.83	7.68	7.25	7.45	7.33
Temperatura (oC)	22.6	22.7	22.8	22.6	22.8
Coliformes Totales (NMP)	4.2	4.2	2.22	49.	1.5
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	1.68	50	2.9	1.8	1.0

La temperatura de los sedimentos varió entre 22.6 a 25.2 °C, en general la temperatura fue mayor en columna de agua que en los sedimentos, principalmente en aquellas estaciones relativamente profundas, hecho que fue notorio que correspondía al período seco. La temperatura es una de las variables ambientales que tienen mayor impacto sobre la actividad microbiana [27, 28, 29], por lo cual es necesario medirla en el sedimento; y así obtener el valor basal.

Los coliformes son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo los humanos. La presencia de bacterias coliformes es un indicio de que el agua puede estar contaminada con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición. Generalmente, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo [30]. Como se observa en la tabla 3, los valores en sedimento de *Escherichia coli*, en período seco son menores a 1 NMP en su mayoría y también en el caso de las Coliformes totales. Se puede observar una diferencia tenue en período lluvioso, donde los valores de *Escherichia coli* en su mayoría, se encuentran entre 1 y 2.9 NMP, con la excepción de un solo punto donde se encontró 50 NMP. Y en el caso de las Coliformes totales el rango se encuentra entre 2 y 4.2; con la excepción de un punto donde se encontró 49 NMP. En otro estudio se señaló que en un área costera impactada por descargas de aguas de alcantarillado y lluvia, los recuentos de coliformes fueron de 2 a 4 órdenes de magnitud mayores en sedimentos que en la columna de agua y concuerda con nuestros resultados de esta investigación. [31]. Los niveles altos de Coliformes y *Escherichia coli* en el sedimento indican riesgo sanitario, asociado a la posible resuspensión de las bacterias hacia la columna de agua [32]. La presencia de estas bacterias en agua se interpreta como contaminación reciente, debido a que el tiempo de sobrevivencia de las bacterias es menor, mientras que en el sedimento puede indicar una contaminación previa [33].

Las muestras son analizadas en un grupo referido como secuencia de análisis. La secuencia comienza con la verificación de la calibración seguida por el análisis

del extracto de las muestras. Adicionalmente se analiza el estándar de verificación al inicio y al final de la secuencia. La secuencia termina cuando el grupo de muestra fue inyectado o cuando se exceda el tiempo de retención y/o el criterio de porcentaje de desviación relativa para el estándar de verificación [34].

Los sedimentos que se acumulan en el fondo de un cuerpo de agua son de gran valor para el estudio de esos ecosistemas, dado que conservan el registro histórico de lo acaecido en el lugar. Las sustancias tóxicas vertidas al agua, por ejemplo, tienden a depositarse en el sedimento y, si éste se remueve, pueden volver a suspensión, quedando a disposición de los organismos de ese ambiente [35]. De esta manera, la composición de los sedimentos; además, de suministrar información sobre la influencia externa de fuentes contaminantes introducidas por el hombre, es un reflejo de la calidad del agua [36]. Son una parte integral e inseparable de los ecosistemas marinos, por lo que cualquier programa de gestión ambiental relativo a la calidad del agua, estaría incompleto sin el debido estudio de sus sedimentos [37].

El petróleo es una mezcla compleja de compuestos polares (compuestos con azufre, nitrógeno, oxígeno o metales pesados en su estructura) y compuestos no polares (hidrocarburos) [38, 39, 40], por lo que al utilizar hexano como disolvente en las extracciones son cuantificables algunos compuestos no polares como los hidrocarburos lineales, que tal vez no requieren tiempos prolongados de extracción al emplear un sistema Soxhlet, cuando el sedimento estudiado presenta una textura limo arcilloso.

Para la calibración del método espectrofotométrico se prepararon patrones a partir de una mezcla de hidrocarburos comerciales (Naftaleno, Fenantreno y Pireno) con una concentración del 99%. Después de realizar tres curvas de calibración y observar la de mejor comportamiento se eligió la que arrojó el coeficiente de correlación (R^2) más cercano a 1 (figura 3). De acuerdo con los datos obtenidos, el valor de R^2 se acercó mucho al valor ideal el cual es 1, esto indica que la curva de calibración se aproxima con una línea recta, indicando alta correlación entre las variables [41].

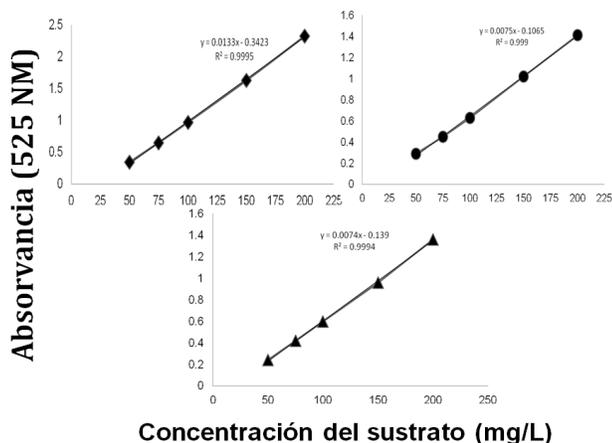


Figura 3. Curva patrón del Naftaleno (■), Fenantreno (●) y Pireno (▲).

De los análisis realizados, el cromatograma de la E3 fue el que presento un valor mayor, que por su tiempo de retención corresponde al fenantreno, cuya concentración es aproximadamente 73 mg/L (figura 4). También se puede observar en la tabla 4, que el cromatograma del E1, presentó también un valor representativo del naftaleno, 66 mg/L y fenantreno, 11 mg/L (figura 5).

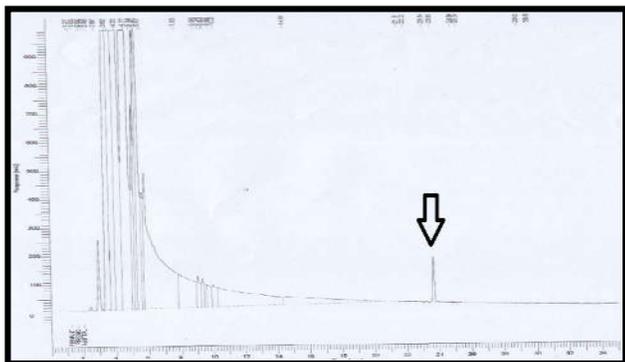


Figura 4. Cromatograma de la E3.

El fenantreno es un hidrocarburo que presenta tres anillos bencénicos fusionados. No es mutagénico o carcinogénico para los humanos, sin embargo, se ha demostrado que es tóxico para los organismos acuáticos. El fenantreno suele usarse como compuesto modelo para el estudio de la biodegradación de los HAP, dado que se encuentra en altas concentraciones en las muestras ambientales [42].

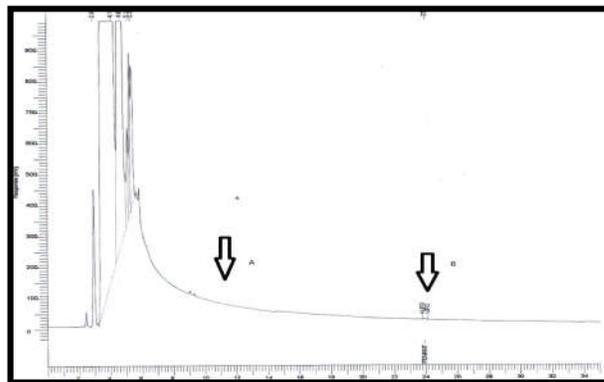


Figura 5. Cromatograma de la E1, Naftaleno (a) y Fenantreno (b).

El naftaleno es una de las moléculas más complejas detectadas en el medio interestelar, está formada por 10 átomos de carbono y 8 de hidrógeno dispuestos en una configuración muy especial. El naftaleno es el poliaromático con estructura más sencilla. Presenta dos anillos bencénicos y baja masa molecular (128,2 g/mol). Su degradación fue una de las primeras rutas estudiadas, comprobándose desde el principio, que el crecimiento sobre este sustrato permitía aislar salicilato y 1,2- dihidro -1,2 - dihidroxinaftaleno del medio de cultivo [39].

La presencia de naftaleno y fenantreno en los ecosistemas se debe a la combustión incompleta de materiales orgánicos como carbón, petróleo, gasolina y madera. Una mínima porción es derivada de incendios forestales y erupciones volcánicas.

Las fuentes antropogénicas de contaminación de ambientes acuáticos con naftaleno y fenantreno son los derrames de petróleo crudo o refinado, efluentes industriales o domésticos, suelo acarreado por erosión hídrica y deposición directa desde la atmósfera [43]. Tanto el naftaleno como el fenantreno, al igual que otros contaminantes pueden ser asimilados por las raíces de las plantas y acumulados, metabolizados o volatilizados [44]. De los HAP estudiados estos fueron los dos encontrados.

En la tabla 4, se presenta las concentraciones de los hidrocarburos encontrados con sus respectivos tiempos de retención.

Tabla 4. Hidrocarburos y concentraciones encontradas en la Bahía de Manzanillo

*C=Concentración encontrada *TR=Tiempo de retención *E=Estaciones

Analito	E	Area	C/(mg/L)	TR/(min)
Naftaleno	1	0.57	66.3	14.6
Fenantreno	1	0.03	10.90	23.59
Fenantreno	2	0.23	18	23.76
Fenantreno	3	0.62	73.42	23.68
Fenantreno	4	0.08	4	23.56
Fenantreno	5	0.10	0.86	23.90
Pireno	-	-	-	-

Las fuentes antropogénicas de contaminación de ambientes acuáticos con naftaleno y fenantreno son los derrames de petróleo crudo o refinado, efluentes industriales o domésticos, suelo acarreado por erosión hídrica y deposición directa desde la atmósfera [43]. Tanto el naftaleno como el fenantreno, al igual que otros contaminantes pueden ser asimilados por las raíces de las plantas y acumulados, metabolizados o volatilizados [44]. De los HAP estudiados estos fueron los dos encontrados.

Al igual que en la Bahía, en los sedimentos alrededor de la montaña Qomolangma (China), reportaron al naftaleno y fenantreno, como compuestos de los más abundantes en las muestras estudiadas [45]. Los resultados sugirieron que las actividades antropogénicas como las descargas accidentales de algunas sustancias pueden contribuir a incrementar los niveles de HAP. Se demostró de igual manera, que los HAP en estas muestras llegaron allí por escorrentías y arrastres como también por derrames puntuales, debido a que se encuentran en los mismos niveles que en otras zonas de características similares, los cuales concuerdan con los resultados obtenidos [46, 47, 48].

4. Conclusiones y recomendaciones

El análisis fisicoquímico y microbiológico de los sedimentos fue un parámetro importante para verificar el grado de contaminación por hidrocarburos o sus derivados; asimismo, la materia orgánica junto con la

textura, sirvieron para evaluar el tiempo de retención de los analitos en el mismo.

En el caso de la Bahía de Manzanillo, en la textura, las fracciones más representativas fueron el limo (entre 83,00% y 90,00%), y la arcilla entre 16,00% a 20,00%; y la arena arrojó un 0,00% en la zona.

Sin embargo, en la estación 3, la fracción textural con mayor porcentaje fue la de limo (90,00%), seguida de arcilla (10,00%) y arena (0,00%). Cabe destacar que el sedimento predominante en la zona costera es de granos delgados.

Cabe señalar que predominan sedimentos limos arcillosos y solo cerca de la zona influenciada por el Río Folks predomina el limo donde se encontraron los valores más altos que corresponde a ambos períodos, tanto lluvioso como seco.

Las tendencias observadas tanto en tamaño de sedimento y el contenido de materia orgánica sugieren un ambiente muy favorable para la afinidad de los compuestos orgánicos como los HAP, a la fracción sólida de la Bahía de Manzanillo; por otra parte, tanto la temperatura (± 23 °C), como el pH neutro (± 7), son favorables tanto para la actividad de tolerancia de algunas bacterias y el consumo de hidrocarburos para otras.

En todas las muestras analizadas, sólo en la que corresponde al E3 que está influenciado a el aporte del agua proveniente del Río Folks se encontró en una concentración aproximada a 73 mg/L del compuesto fenantreno. En el caso de la E1 se encontró una concentración de 66 mg/L de naftaleno.

En cuanto a los orígenes de los aportes de estos HAP cuantificados en los sedimentos muestreados durante todo el período mostró signos de una impronta pirolítica (quema de combustibles fósiles) en el sistema. Las E1 y E3 mostraron alternativamente puntuaciones pirolíticas y petrogénicas, indicando un aporte mixto en cada caso (derrame de combustibles fósiles/petróleo y quema de combustibles). Los resultados mostraron que todas las muestras de sedimentos excedieron todo el nivel de "rango de efectos" correspondiente a compuestos individuales como es el caso del fenantreno [49].

Los tiempos de extracción de hidrocarburos y compuestos derivados del petróleo varían de un suelo o sedimento a otro dependiendo de las características físicas y químicas. Por lo cual se sugiere efectuar la extracción de hidrocarburos en sedimento, cuando se

emplee un sistema de extracción Soxhlet, a tiempos diferentes de los propuestos en las normas o metodologías empleadas, para garantizar que se reportará la máxima cantidad de hidrocarburos y compuestos derivados del petróleo en el suelo que se estudie.

Después de analizar los resultados se recomienda el monitoreo de HAP en agua, sedimentos y en efluentes como una metodología adecuada para asegurar la calidad del entorno y así establecer parámetros de control y normativas para el monitoreo de las zonas costeras.

5. Agradecimiento

Los autores agradecen al Servicio Aéreo Naval de Panamá, Autoridad Portuaria de Panamá, al Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Panamá, por su valiosa colaboración y participación en las diversas campañas de muestreos y análisis de muestras de algunos parámetros ambientales y a la Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el financiamiento para realizar esta investigación, a través del Proyecto EFA-010-018.

6. Referencias

- [1] Hopkinson, C. S., Giblin, J., Tucker, R. H. y Garritt., 1999. Benthic metabolism and nutrient cycling along an estuarine salinity gradient. *Estuaries*. 22 pp. 863-881.
- [2] Revhsbech, P., Sørensen, H., Balckburn, y Lomholt J., 1980. Distribution of oxygen in marine sediments measured with microelectrodes. *Limnology and Oceanography*. 2 pp. 403-411.
- [3] Mackin, J. E. y Swider, K. T., 1989. Organic matter decomposition pathways and oxygen consumption in coastal marine sediments. *Journal of Marine Research*. 47 pp. 681-716.
- [4] Santa, J., Serrano, M. y Stashenko, E., 2002. Análisis comparativo de diferentes métodos de extracción de hidrocarburos presentes en aguas residuales industriales. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2(3), 49-60.
- [5] Díaz, N.; Alfaro, J. y Garza, H., 2001. Método analítico para detectar hidrocarburos aromáticos policíclicos en agua potable. *Revista Ciencia UANL*, Vol. 4, Núm. 4, pp.420-425.
- [6] Bonert, C., Pinto, L. y Estrada, R., 2006. Determinación de hidrocarburos en muestras de agua y sedimentos alrededor de la isla Robinson Crusoe. *Revista Ciencia y Tecnología del Mar*, Vol. 29, Núm. 2, pp. 23-26.
- [7] Alemán, A., 2009. Determinación de Hidrocarburos Totales del Petróleo en suelo y sedimentos de la Cuenca del Río Coatzacoalcos. Tesis
- [8] Morehead, R., Eadie, J., Lake, B., Landrum, P. y Berner, D., 1986. The soption of PAH onto disolved organic matter in the Lake Michigan waters. *Chemosphere*, 15:403-412.
- [9] Sheppard, F., 1954. Nomenclature based on sand-silk-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24(3): 151-158.
- [10] Igarza, M., 2012. *Materia Orgánica Sedimentaria reciente del margen continental peruano*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Tesis.
- [11] American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM) D5369-93. 2003. Standard practice for extraction of solid waste simples for chemical analysis using soxhlet extraction. *Environmental Assessment, Book of Standards*, Vol. 11.04, September 2004.
- [12] EPA-US 3541, 1994. Automated soxhlet extraction. SW-846 Test methods for evaluating solid waste physical/chemical methods.
- [13] EPA-US 3540C., 1996. Method Soxhlet extraction. United States Environmental Protection Agency, SW-846 Manual. Washington, DC: Government Printing Office. 1-8 pp.
- [14] Calva, L., Pérez, A. y Márquez, A., 2006. Contenido de carbono orgánico y características texturales de los sedimentos del sistema costero lagunar Chantuto-Panzacola, Chiapas. *Hidrobiológica*, 16(2): 127-135.
- [15] Aguilera, D., 2005. Evaluación geoquímica de los sedimentos superficiales de las bahías este y oeste del Morro de Puerto Santo, estado Sucre, Venezuela. Trabajo de Grado de Maestría Ciencias Marinas. Instituto Oceanográfico de Venezuela. Universidad de Oriente, Cumaná.
- [16] Manheim, F. T., Meade R. y Bond C. C, 1970. Suspended matter in surface waters of the Atlantic continental margin from Cape Cod to the Florida Keys. *Science*, 167(3917), 371-376.
- [17] LA Manna, L., Buduba, C., Alonso, V., Davel, M., Puentes, C., y Irisarri, J., 2007. Comparación de métodos analíticos para la determinación de materia orgánica en suelos de la región Andino-Patagónica: efectos de la vegetación y el tipo de suelo. *Ciencia del suelo*, 25(2), 179-188.
- [18] Dale, N., 1974. Bacteria in intertidal sediments: factors related to their distribution. *Limnology and Oceanography* 19:509-518.
- [19] Christodoulatos C. y Mohiuddin, M., 1996. Generalized models for prediction of pentachlorophenol adsorption by natural soils. *Water environment research*, 370-378.
- [20] Fall, C., Chavarie, C. y Chaouki, J., 2001. Generalized model of pentachlorophenol distribution in amended soil-water systems. *Water Environ Res* 73:110-117.
- [21] Domínguez, V., Vidal, G. y Martínez, M., 2004. Sorptive behavior of clorophenols on river volcanic sediment. *Bull Environ Contam Toxicol* 73:519-526.
- [22] Establier, R., Blasco, J., Gómez, A. y Escobar, D., 1984. Materia orgánica en los sedimentos de la Bahía de Cádiz y sus zonas de marismas y salinas. *Investigación Pesquera* 48 (2): 285-301.
- [23] Gomes, A. y Azevedo, D., 2003. Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in Tropical Recent Sediments of Campos de Goytacazes, RJ, Brazil. *Journal Brazil Chemical Society* 14 (3): 358-368.

- [24] Perigó, E., Montalvo J., Martínez, M., Ramírez, O., Álvarez, G., Simanca, J., Perigó, A., Ballón, C. y Pérez, S., 2005. Presiones Antropogénicas y su relación con la Calidad Ambiental de la Ecoregión del Golfo de Batabanó. Impactos y Respuestas. Revista CENIC Ciencias Biológicas, Vol. 36, No. Especial, 2005.
- [25] Navarrete, A., Rivera, J., Beltrán, V. y López, N., 2000. Distribución de los sedimentos en la Bahía de Chetumal, Quintana Roo. México. Hidrobiología, 2000 10 (1): 61-67.
- [26] Giere, O., 1993. Meiobenthology, the microscopic fauna in aquatic sediments. Spinger-Verlag, Hamburg, 320 p.
- [27] Arbeli, Z., 2009. Biodegradación de compuestos orgánicos persistentes (cop): el caso de los bifenilos policlorados (pbc). Acta Biológica Colombiana; vol. 14, núm. 1 (2009); 56-86.
- [28] Kiely, G., 1999. Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Entornos, Tecnologías y Sistemas de Gestión. 1era Edición. España, Mc Graw – Hill / Interamericana de España.
- [29] Domínguez, M., Correa, J., Vidal, G., López, A. y Martínez, M., 2002. 2,4,6-Trichlorophenol Degradation by River Sediment Exposed to Bleached Kraft Mill Discharge. Bull Environ Contam Toxicol 69:463-470.
- [30] Munn, C., 2004. Marine Microbiology: ecology and applications. New York: BIOS Scientific Publisher; 2004.
- [31] Shiaris, M.; Rex, C.; Pettibone, G.; Keay, K.; Mcmanus, P.; Rex, M. y Gallagher, E., 1987. Distribution of indicator bacteria and *Vibrio parahaemolyticus* in sewage-polluted intertidal sediments. Applied and Environmental Microbiology, 53(8), 1756-1761.
- [32] Craig, D.; Fallowfield, H.; y Cromar, H., 2004. Use of microcosms to determine persistence of *Escherichia coli* in recreational coastal water and sediment and validation with *in situ* measurements. *Journal of Applied Microbiology* 96: 922-930.
- [33] Obiri-Danso, K. y Jones, K., 2000. Intertidal sediments as reservoirs for hippurate negative Campylobacters, Salmonellae and faecal indicators in three EU recognized bathing waters in North West England. *Water Research* 34: 519-527.
- [34] Esquivel, C., 2007. Metodología analítica para la determinación de hidrocarburos fracción media en muestras de de suelo. Instituto Politecnico Nacional. México D. F. Tesis de Pregrado.
- [35] Mariani, C. y Pompeo, M., 2008. La calidad del sedimento. Ciencia hoy: Asociación Ciencia Hoy, 18: 48-53.
- [36] Álvarez, M., Méndez, F. y Chirinos, J., 2007. Estudio ambiental preliminar de los sedimentos de tres embalses de la región centro norte de Venezuela. Ciencia, 15(2): 259-269.
- [37] Singh, A., Hasnain, S. y Banerjee, D., 1999. Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Damodar River: a tributary of the lower Ganga, India. Environmental geology, 39 (1): 90-98.
- [38] Murgich, J., Abanero, A. y Strausz, O., 1999. Molecular recognition in aggregates formed by asphaltene and resin molecules from the Athabasca oil sand. Energy & Fuel 13(2): 278-286.
- [39] Centeno, G., Trejo, F., Ancheyta, J. y CARLOS, A., 2004. Precipitación de asfaltenos del crudo Maya en un sistema a presión. Revista de la Sociedad Química de México 48 (3): 179-188.
- [40] Melo, R. y Cuamatzi, O., 2007. Bioquímica de los procesos metabólicos. 2a. ed. Reverté, México. 406 pp.
- [41] Eurachem, 1998. Métodos Analíticos adecuados a su propósito, Guía de Laboratorio para Validación de Métodos y Tópicos. Ed. 1. 1998.
- [42] Herrera, M., Rodríguez, A. y Guerrero, Z., 2008. Evaluación del crecimiento, actividad de hemoperoxidasas y remoción de fenantreno de los cultivos celulares de *Fouquieria Splendens* y *Fouquieria Fasciculata*. Polibotánica, 25: 101-119.
- [43] Castro, L., Delgadillo, J., Ferrera, R. y Alarcón, A., 2008. Remoción de fenantreno por azolla caroliniana utilizando bioaumentación con microorganismos hidrocarbonoclastas. Interciencia, 33(8): 591-597.
- [44] Reynolds, C. y Skipper, H., 2005. Bioremediation of contaminated soils. Principles and Applications of Soil Microbiology. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, EEUU. Págs. 536-561.
- [45] Wang, X., Yao, T., Cong, Z., Yan, X., Kang, S. y Zhang, Y., 2007. Concentration level and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and grass around Mt. Qomolangma, China. Chinese Science Bulletin, 52(10): 1405-1413.
- [46] Falcon, R., 2002. Degradación del Suelo, causas, procesos, evaluación e Investigación. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación ambiental y Territorial. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- [47] Mendiguchía, C., 2005. Utilización de ultratrazas de metales pesados como trazadores de los efectos antropogénicos producidos en ecosistemas acuáticos. Tesis doctoral. Universidad de Cádiz.
- [48] Ocasio, F., 2008. Evaluación de la Calidad del Agua y posibles fuentes de contaminación en un segmento del Río Piedra. Tesis de Maestría. Universidad Metropolitana, San Juan, Puerto Rico.
- [49] Long, E. y MacDonald, D., 1998. Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems. *Human and Ecological Risk Assessment*, 4(5), 1019-1039.

Efecto sobre las propiedades reológicas y panificables de la enzima transglutaminasa en masas con almidón de yuca (*Manihot esculenta*)

Effect of transglutaminase on the reological and bakery properties of cassava (*Manihot esculenta*) dough

Olmedo Hernández¹, Indira Franco¹

¹Facultad de Ciencias y Tecnología. Universidad Tecnológica de Panamá,
hernandezolmedojesus@gmail.com, Indira.franco@utp.ac.pa

Resumen—La yuca (*Manihot esculenta*) es una raíz cultivada ampliamente en las regiones de América Central y el Caribe, y su almidón puede utilizarse en productos de panificación. Se realizó un estudio del efecto de la enzima transglutaminasa microbiana (TG) en masas con harina de trigo, en las que se sustituyó parcialmente ésta con almidón de yuca en un 20%, 40%, 60%, 80% y 100% utilizando diferentes concentraciones de TG sobre la fórmula: 0.01%, 0.02% y 0.03%. El producto fue elaborado siguiendo un proceso semiartesanal de panificación por método directo.

El producto terminado fue sometido a determinaciones fisicoquímicas, como humedad y volumen específico. Se desarrolló además un análisis de perfil de textura (TPA) para medir variables como su fuerza y elasticidad. La humedad de las muestras osciló en un rango conforme de 30% a 32%. El perfil de textura obtenido indica que la enzima no tiene un efecto positivo en la mayoría de las muestras estudiadas, sin embargo, en una concentración de 0.02% y con un 20% de sustitución de la harina mejora algunas de sus propiedades. Bajo estas condiciones de uso de enzima STG-M se mejoró las propiedades estructurales de la miga, siendo conforme la distribución alveolar y fracturabilidad.

La sustitución de harina de trigo por almidón de yuca es viable hasta en un 20% y 0.02% como dosis óptima de TG desde la perspectiva estructural. La fracción alveolar también alcanza un máximo en este punto, efecto beneficioso que se traduce en mayor retención de gas.

Palabras claves—almidón de yuca, panificación, perfil de textura, transglutaminasa, yuca (*Manihot esculenta*).

Abstract—Cassava (*Manihot esculenta*) is a root widely cultivated at regions of Central America and the Caribbean; its starch can be used in bread products. The aim of this study is determine the effect of the enzyme microbial transglutaminase (TG) in dough with wheat flour partially replaced by cassava starch in 20%, 40%, 60%, 80% and 100 % using different TG concentrations on the formula: 0.01%, 0.02% and 0.03%. A semi-artisanal bread process was done in the manufacturing, monitored by direct method. The finished product was tested and physicochemical determinations were realized, as moisture and specific volume. Texture profile analysis (TPA) was developed to measure variables as strength and elasticity. The humidity of the samples was in a range as 30% to 32%. The texture profile shows there is not an important effect in the samples studied, but in the sample with 0.02% of TGA and with 20% of substitution of the flour, some properties were improved. The use of enzyme STG- M improved structural properties of the crumb, being as the alveolar distribution and fracturability.

The replacement of wheat flour by cassava starch is feasible up to 20% and 0.02% as optimal dose of TG from a structural perspective. The alveoli also reach a maximum at this point; its beneficial effect is an indicator of major gas retention.

Keyword—cassava starch, bread baking, texture profile, transglutaminase, cassava (*Manihot esculenta*).

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 24 de noviembre de 2015

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

1. Introducción

El alto contenido de almidón de la yuca y su mayor proporción de amilosa, en comparación con otras fuentes de almidón, hace de este un importante cultivo industrial. El almidón de yuca es la segunda fuente de almidón en el mundo después del maíz, por encima de la papa y el trigo. Es utilizado esencialmente sin modificar, como almidón nativo, pero también se ha modificado con diferentes tratamientos, para mejorar sus propiedades de consistencia, viscosidad, estabilidad a cambios del pH y temperatura, gelificación y dispersión. De esta forma puede emplearse en diferentes aplicaciones industriales que requieren ciertas propiedades particulares. En panificación el almidón de yuca se emplea en la elaboración de productos horneados como pan de bono, pan de yuca y bocadillos tales como «rosquillas» y «besitos». Sin embargo, algunas veces esta adición puede alterar las propiedades panarias de los productos. Este almidón es tradicional en Brasil y Colombia [1]. Panamá es un nicho en donde se puede crear industria para la producción de este almidón, y se ha comprobado que la adición de este almidón abarata los costos de producción de panes [2].

Las enzimas son una herramienta útil en panificación debido a su capacidad para mejorar las propiedades de la masa y la calidad final en el producto. La transglutaminasa microbiana (TG), es una acil transferasa que cataliza reacciones entre residuos de proteínas, introduciendo enlaces covalentes y entrecruzamiento entre las moléculas de proteínas y péptidos, contrario a la mayoría de las enzimas que hidrolizan los sustratos en componentes menores [3].

En el gluten esta enzima induce la formación de polímeros de alto peso molecular y produce modificaciones en la elasticidad y en la fuerza de la masa. El efecto más importante fue observado en medialunas leudadas y en pasteles esponjosos. Otros autores observaron que a medida que se incrementaba la dosis de transglutaminasa disminuía el índice de gluten y todos los parámetros alveográficos. Finalmente, se reportó que el efecto de la enzima depende de la dosis utilizada, bajos niveles de transglutaminasa causan efectos positivos en el pan, mientras que altos niveles disminuyen notoriamente la calidad del pan. Sin embargo, no se conoce bien cuál es el mecanismo por el que la dosis óptima de TG produce una comprobada

mejora en la calidad panadera. A su vez, en la elaboración de masas congeladas, el agregado de estas enzimas podría contrarrestar el daño causado en la red de gluten por el almacenamiento congelado [4, 5].

Es por ello que el objetivo de esta investigación fue estudiar la viabilidad del empleo de almidón de yuca (*Manihot esculenta*) como sustituto en diferentes proporciones de harina de trigo y determinar el efecto sobre la textura de masas de pan tras la adición de enzima transglutaminasa (TG). Para una mejor comprensión del material, el artículo se ha estructurado con una breve introducción, luego la metodología relacionada con la preparación de las muestras y los análisis realizados para conseguir los objetivos planteados, la presentación de los resultados y discusión de los mismos y luego las conclusiones del desarrollo de la investigación.

2. Metodología

2.1 Preparación de las muestras

Se realizó un estudio del efecto de la TG en masas con harina de trigo, en las que se substituyó parcialmente harina dura de trigo con almidón de yuca. La TG utilizada fue proporcionada por la empresa Ajinomoto, del tipo Activa®STG-M. Se siguió un proceso semiartesanal de elaboración por método directo. Las variables en la investigación se muestran en la tabla 1, y el diseño de la investigación se muestra en la tabla 2. La tabla 3 presenta la formulación y diagrama operacional para la obtención del pan.

2.2 Análisis fisicoquímicos

Todos los análisis fueron realizados con tres rebanadas de pan de cada una de las muestras.

Propiedad Viscoelástica

Para evaluar la propiedad viscoelástica se utilizó como referencia la tabla 4, que clasifica el producto en función del extensograma de la harina y las características de desarrollo de la masa del pan.

Unidades STG-M / g Proteína

Las unidades de enzima transglutaminasa por gramo de proteínas fueron calculadas en base a las unidades contenidas declaradas en la hoja técnica Activa® STG-M y el aporte proteico de las materias primas a la fórmula respectiva según lo indicado en la ficha técnica o la información nutricional de dichos insumos.

Tabla 1. Factores en estudio en la investigación

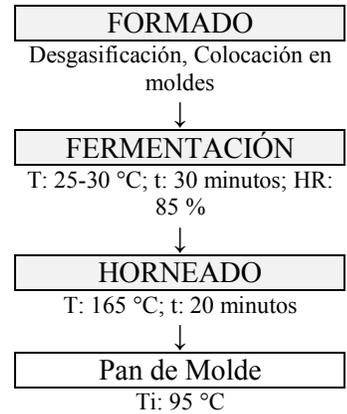
Ingredientes	Contenido (%)	Código de muestra
% Harina de Trigo (A)	100	A1
	80	A2
	60	A3
	40	A4
	20	A5
	0	A6
% Almidón Agrio de Yuca (B)	0	B1
	20	B2
	40	B3
	60	B4
	80	B5
	100	B6
% Enzima STG-M (C)	0.00	C1
	0.01	C2
	0.02	C3
	0.03	C4

Tabla 2. Combinaciones entre factores

Harina Trigo (%)	Almidón Yuca (%)	Enzima Transglutaminasa (%)			
		0.00	0.01	0.02	0.03
100	0	A1B1C1	A1B1C2	A1B1C3	A1B1C4
80	20	A2B2C1	A2B2C2	A2B2C3	A2B2C4
60	40	A3B3C1	A3B3C2	A3B3C3	A3B3C4
40	60	A4B4C1	A4B4C2	A4B4C3	A4B4C4
20	80	A5B5C1	A5B5C2	A5B5C3	A5B5C4
0	100	A6B6C1	A6B6C2	A6B6C3	A6B6C4

Tabla No. 3. Formulación y diagrama operacional de bloque para el proceso de elaboración del pan

A	Harina de Trigo	<p>→ PESADO</p> <p>↓</p> <p>MEZCLADO Baja y mediana velocidad: 5 minutos Rápido: 15 minutos</p> <p>↓</p> <p>REPOSO T: 25-30 °C; t: 10 minutos</p> <p>↓</p> <p>DIVISIÓN Y BOLEADO 6 unidades; 0.450 Kg c/u</p> <p>↓</p> <p>REPOSO T: 25-30 °C; t: 30 minutos</p> <p>↓</p>
B	Almidón de Yuca	
C	STG-M	
2.00 %	Levadura	
5.00 %	Azúcar	
1.80 %	Sal	
8.00 %	Mantequilla	
55.00 %	Agua (22°C)	



Humedad

El estudio de esta variable se realizó utilizando una balanza de humedad marca Precisa®, modelo XM50. La humedad es tomada como la pérdida de peso por secado empleando una balanza de torsión sensible para posar la muestra y una lámpara infrarroja para secar.

Volumen Específico

El volumen específico del pan fue calculado de acuerdo al método AACC 10-05.01 [6], dividiendo el volumen entre el peso del corte de rebanada de pan. El volumen de la rebanada fue medido por desplazamiento del contenido de semilla de sésamo. El volumen desplazado de las semillas es considerado el volumen de la rebanada de pan. El volumen específico (VE) del pan fue calculado de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$VE = \frac{v}{m} \quad (1)$$

Dónde:

v = Volumen desplazado; [mL]

m = Masa de la fracción de rebanada de pan; [g]

Tabla 4. Extensogramas de harinas con diferentes propiedades viscoelásticas relacionadas con las características de panes correspondientes

Extensograma	Desarrollo del pan	Propiedad
A 		Plástica y corta
B 		Rígida y corta

		Elástica y extensible
		Extensible
		Fluida

Fuente: Pizzinato (1997).

Fracción Alveolar

La estructura de la miga, se puede evaluar a través de medidas del tamaño de alvéolo por medio de análisis de imágenes de la miga de pan. La imagen entera es fragmentada por un valor de gris para crear una imagen binaria. Todos los píxeles con nivel de gris por encima del umbral se muestran en blanco, y por debajo en negro como se observa en la figura 5.

Se ha utilizado el programa ImageJ.lnk (Estados Unidos) como analizador de imágenes para estudiar la estructura de la miga de rebanadas de la región central de cada molde de pan. De ahí se calculó el área negra de la imagen recortada ya convertida a imagen binaria. Esta área corresponde a la fracción alveolar que integra la miga de la rebanada analizada.

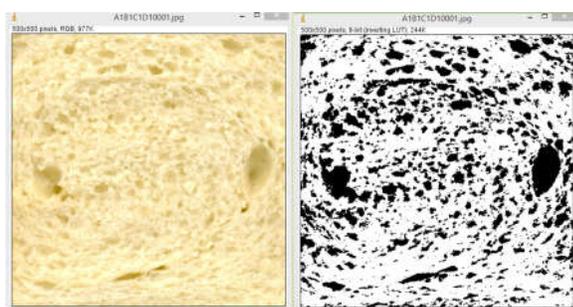


Figura 1. Fotografía de una rebanada de pan. A su lado, imagen binarizada de esta rebanada.

2.3 Análisis con microscopía

Microscopía de la Miga

Las muestras de pan fueron analizadas mediante microscopía y se pudo observar la distribución alveolar, celdas y túneles en la miga de las rebanadas. Se utilizó un microscopio Konus™ Academy #5304 (Estados Unidos). De cada rebanada de pan se tomó una muestra haciendo un corte transversal de 1 mm y luego se observó en el microscopio con el objetivo 10 x.

2.4 Análisis texturales

Perfil de Textura

Se empleó un Texturómetro TA. XT plus Texture Analyzer Stable Micro Systems (Reino Unido), calibrado previamente a cada análisis, distancia de sonda: 20 mm, Sonda: P/10.

Se determinaron siete parámetros texturales que derivan de la curva de análisis de textura (figura 2):

- Dureza, la fuerza máxima en el primer ciclo de compresión (H).
- Fracturabilidad, el primer pico significativo en la curva del primer ciclo de compresión (F).
- Cohesividad, la relación entre el área positiva durante el segundo ciclo de compresión y el primero (A_4/A_1+A_2).
- Adhesividad, el área negativa del primer ciclo de compresión (A_3). Representa el trabajo necesario para retirar el sensor de la muestra.
- Elasticidad, la altura que la muestra recupera entre el término del primer ciclo de compresión y el inicio del segundo (C).
- Gomosidad, el producto de la dureza y cohesividad.
- Masticabilidad, producto de gomosidad y elasticidad.

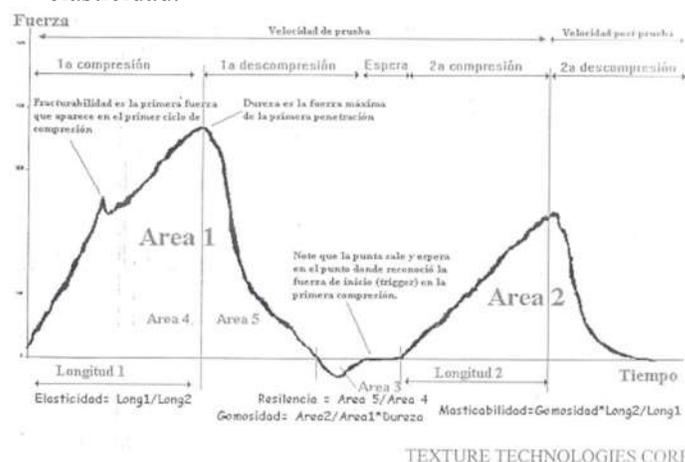


Figura 2. Curva Modelo de Perfil de Textura.

Todas las determinaciones se realizaron por triplicado, y fueron sometidos a pruebas de ANOVA para determinar las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los valores encontrados, utilizando el *software SPSS 20* (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). La prueba de Tukey se utilizó para establecer las diferencias significativas entre las muestras.

3. Resultados y discusión

Se desarrollaron formulaciones en las que se reemplazó parcialmente harina de trigo por almidón de yuca, basadas en pruebas preliminares. Para cada una de estas formulaciones se utilizaron concentraciones de STG-M de 0.01%, 0.02% y 0.03%. De acuerdo a la tabla de clasificación de harinas y masas según su comportamiento y desarrollo viscoelástico desarrollada por Pizzianatto (1997), las masas controles presentan propiedad elástica y extensible hasta una sustitución de harina de trigo por almidón de yuca de 20% [7]. A partir de una sustitución de 40% de la harina, la masa tiene un desarrollo caracterizado por mínimo volumen de desarrollo; la sustitución en un 60% y 80% origina en la masa un desarrollo con propiedad plástica y corta en su estructura, mientras que al emplear como base almidón agrio de yuca al 100 % se obtiene una masa fluida, que al igual a las dos anteriores no presenta calidad panadera.

Cualitativamente la adición de enzima transglutaminasa (TG) causa en la masa patrón (100% harina dura de trigo) la pérdida de elasticidad al ser utilizada en dosis equivalente a 0.03%. En un rango de uso de enzima transglutaminasa STG-M de 0.01% a 0.02% no causa efecto significativo como se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Determinación cualitativa de la propiedad viscoelástica para las diferentes masas

Propiedad Viscoelástica		STG-M (%)			
		0.00	0.01	0.02	0.03
Harina de Trigo (%) : Almidón de Yuca (%)	100:0	 Elástica y extensible	 Elástica y extensible	 Elástica y extensible	 Extensible
	80:20	 Extensible	 Extensible	 Extensible	 Extensible
	60:40	 Rígida y corta	 Rígida y corta	 Rígida y corta	 Rígida y corta
	40:60	 Plástica y corta	x	x	X
	20:80	 Plástica y	x	x	X

		corta			
0:100			x	x	X

x: Ensayo descartado.

Unidades de Transglutaminasa / Gramo de Proteína

A medida que disminuyó el contenido proteínico por la sustitución parcial de harina de trigo por almidón agrio de yuca aumentó la proporción de Unidades de enzima STG-M por gramo del nutriente, como se puede observar en la figura 3. En un estudio realizado en el que se utilizó harina de soya, harina de arroz, almidón de papa y harina de maíz para crear un pan sin gluten, y tres concentraciones diferentes de la enzima: 0.1, 1.0 y 10 U de STG-M/ g de proteína, se obtuvieron buenos resultados al utilizar entre 0.1 y 1.0 U de STG-M/ g de proteína [6]. Por ello se decidió trabajar en este rango de unidades de STG-M.

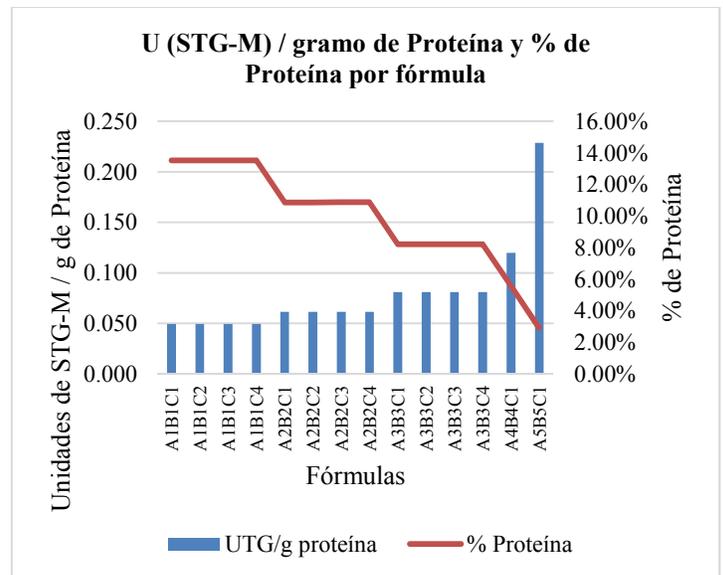


Figura 3. Valor de unidades de enzima transglutaminasa por gramo de proteína y contenido proteínico teórico según fórmula experimental para las diferentes formulaciones.

Humedad

El contenido de humedad no varió de manera significativa ($p < 0.05$) entre las diversas formulaciones, manteniéndose en un rango conforme entre 30% y 34%, siendo el valor máximo permitido de 38% para el pan blanco. En un estudio anterior [8] se encontraron diferentes resultados, ya que el uso de TG aumenta el contenido de humedad de los panes comparados con el control. Algunos componentes como la goma guar en

las formulaciones también ayuda a incrementar el contenido de humedad en las mismas [9].

Volumen Específico

La sustitución de harina de trigo por almidón de yuca se traduce en una disminución del volumen específico del pan a medida que se introduce en la fórmula mayor contenido del almidón de yuca. El volumen específico disminuye hasta en un 24% al hacer una sustitución del 80% de harina de trigo (figura 4), debido a que una harina con alto contenido de gluten presenta abundantes uniones disulfuro intercatenarias, permitiendo obtener un pan con alto volumen. En caso opuesto, si el gluten muestra abundantes grupos sulfhidrilo, no tiene la capacidad de retener el gas, lo que conduce a un bajo volumen. La altura en las rebanadas puede observarse en la tabla 6.

Los resultados para el análisis del volumen específico del pan sugieren que resulta viable hacer una sustitución hasta un 20% de harina de trigo. Lo anterior coincide con lo reportado por otros grupos de investigación [10] donde concluyen que la sustitución de harina de trigo por harina de yuca hasta un límite de 30% no afecta el volumen y la estructura del producto.

Tabla 6. Altura indicativa del volumen desarrollado por la estructura de las muestras de pan analizadas

		STG-M (%)			
		0.00	0.01	0.02	0.03
Harina de Trigo (%) : Almidón de Yuca (%)	100:0				
	80:20				
	60:40				
	40:60		-	-	-
	20:80		-	-	-

El uso de la TG como mejorador de volumen es notorio, ya que se da un incremento de un 48.7% al usar dosis de 0.03% de STG-M sobre base de harina de trigo. Para las masas con sustitución equivalente a 20% de almidón agrio de yuca, el volumen específico alcanza un máximo al utilizar sobre base de harina 0.01% de STG-M. Sin embargo, resultados contrarios donde no se mostró una mejora significativa ($p < 0.05$) al añadir TG en una masa que contenía almidón de yuca pregelatinizado y harina de yuca fue publicado [11]. TG puede causar disminuciones en el volumen del pan, particularmente cuando se usa en altas concentraciones por medio de catalizar la formación de una red de proteína que no ocurriría en la ausencia de la enzima [12].

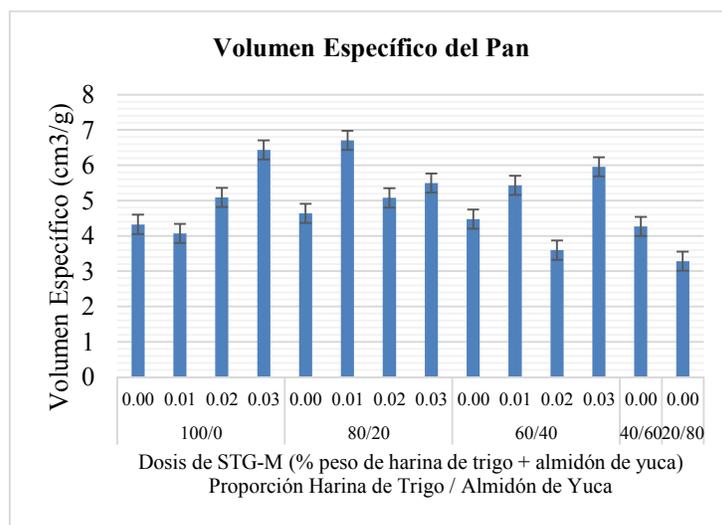


Figura 4. Valores del volumen específico del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

Fracción Alveolar

El efecto positivo de la enzima TG en la fracción alveolar presente en la miga del pan se observó mayormente al ser utilizada en una concentración de 0.02% STG-M sobre peso de harina de trigo y una sustitución por almidón de yuca de 20%, al alcanzar el registro más alto en cuanto a la fracción de alveolos y que físicamente es aceptable o considerado conforme. En este punto la fracción alveolar aumenta con respecto al control un 40%, y como se ha mencionado anteriormente, se trata de una miga propia del tipo de pan desarrollado: cerrada, con paredes delgadas y celdas uniformes. El carácter de la miga se puede observar en la tabla 7.

Es notoria la disminución en la fracción alveolar media de las rebanadas de pan conforme al incremento en la sustitución por almidón de yuca. La fracción alveolar disminuye como se observa en la Tabla 7 en un 2.77% al sustituir 20% del almidón de trigo y 59.55% al sustituir el 80% de la harina de trigo duro inicialmente empleada. Esta disminución en la fracción alveolar es indicadora de una menor retención de gas carbónico.

Tabla 7. Distribución alveolar analizada mediante la conversión a imagen binaria de rebanadas escaneadas para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas

Distribución alveolar		STG-M (%)			
		0.00	0.01	0.02	0.03
Harina de Trigo (%) : Almidón de Yuca (%)	100:0				
	80:20				
	60:40				
	40:60		-	-	-
	20:80		-	-	-

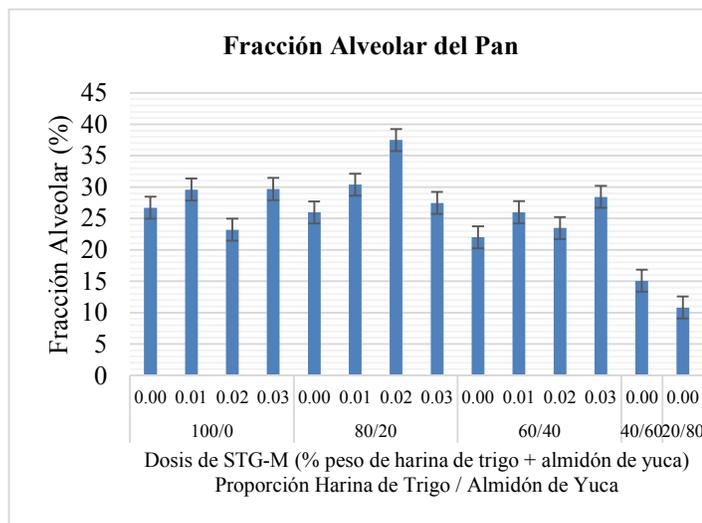


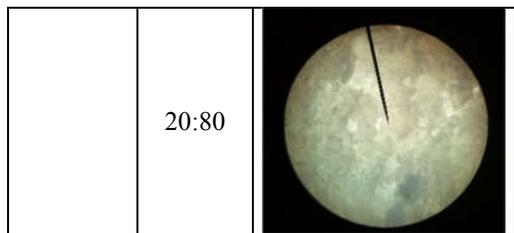
Figura 5. Valores para la fracción alveolar del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

Microscopía de Miga

La microestructura del pan se ilustra en las figuras presentadas en la tabla 8. Se encuentra una disminución en el tamaño de las celdas de la miga a medida que se incrementa la sustitución de harina de trigo, se hace más cohesiva su estructura y por ende es más cerrada dicha miga. Esta cohesividad otorga además mayor densidad y un volumen específico que disminuye a medida que aumenta la sustitución de harina de trigo por almidón agrio de yuca. Esto se encuentra relacionado directamente con el aumento de dureza al incrementar la concentración de STG-M en las muestras.

Tabla 8. Microscopías de miga de muestras con sustitución parcial de harina de trigo por almidón de yuca.

Microscopía 10x		STG-M (%)	
		0.00	
Harina de Trigo (%) : Almidón de Yuca (%)	100:00		
	80:20		
	60:40		
	40:60		



Perfil de Textura

La textura puede ser considerada una manifestación de las propiedades reológicas de los alimentos, y constituye un atributo de calidad imprescindible, ya que de ello depende la aceptabilidad del producto de panificación [13].

Dureza

No existe diferencia significativa ($p < 0.05$) en los valores de dureza en la miga del pan cuando se adicionó una concentración de enzima de 0.03% y se utilizó un 20% de harina de yuca en la formulación, como puede observarse en la figura 6. Sin embargo, la enzima parece no tener efecto en la dureza cuando se añadió a menores concentraciones, ya que los valores de la misma aumentan hasta un 270% comparando con el control y sustituyendo la harina de trigo con un 60% de almidón agrio de yuca. El incremento en la dureza de la miga se ha estudiado en trigo [14] y en panes sin gluten [8], encontrándose un comportamiento similar.

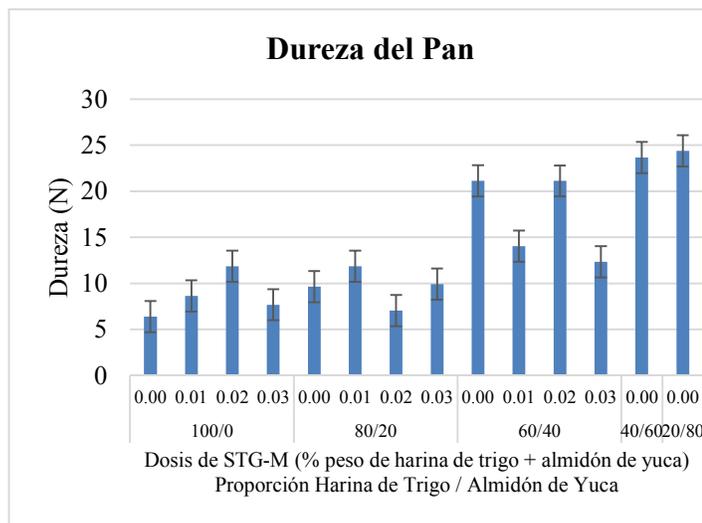


Figura 6. Factores de dureza del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

Fracturabilidad

La fracturabilidad es una propiedad que está muy ligada a la dureza del pan, puesto que entre mayor es la dureza de la miga, más quebradiza y fracturable será.

Los diferentes valores para la fracturabilidad se pueden apreciar en la figura 7. No existe diferencia significativa en los valores de fracturabilidad ($p < 0.05$) al utilizar diferentes dosis de enzima TG, cuando se utiliza un 20% de harina de almidón de yuca en la formulación. Por otra parte, hay un aumento en los valores de fracturabilidad cuando se incrementó el porcentaje de almidón de yuca a un 40% y 60%, que es mucho más notorio en los controles. Cuando se utilizó una dosis de 0.01% de STG-M, los valores de fracturabilidad son mayores, alrededor de 1.5 N, ya que estos valores se mantienen alrededor de 1 N cuando se añade 0.02% de STG-M en la formulación control y al utilizar 20% de almidón de yuca.

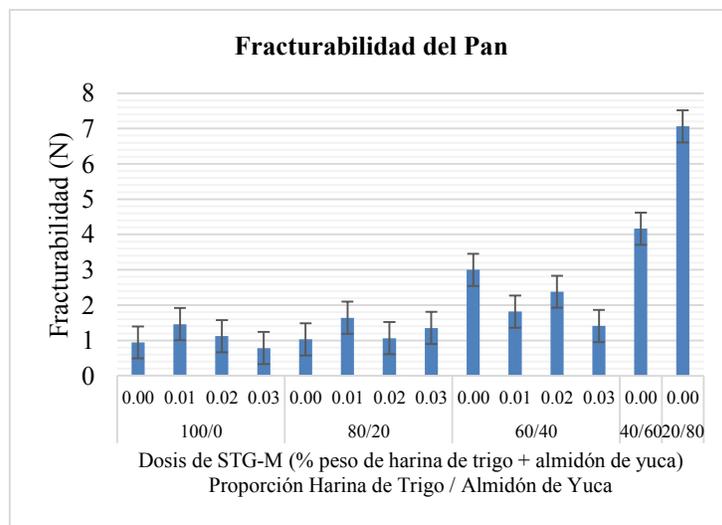


Figura 7. Valores de fracturabilidad del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

Cohesividad

Se presenta en la figura 8 los resultados para los valores de cohesividad en las diferentes muestras. Se observa una disminución en la fuerza con la que están unidas las partículas conforme aumenta la sustitución de harina de trigo por almidón de yuca. Esta disminución viene dada por enlaces y uniones de menor fuerza entre el almidón de yuca y la red de gluten formada por la harina de trigo. Esta disminución es más notoria cuando se incrementa en más de un 40% el contenido de almidón de yuca en la formulación panadera. La disminución de la cohesividad con el aumento de la cantidad de almidón de yuca tiene una relación directa con el aumento de la fracturabilidad de las muestras.

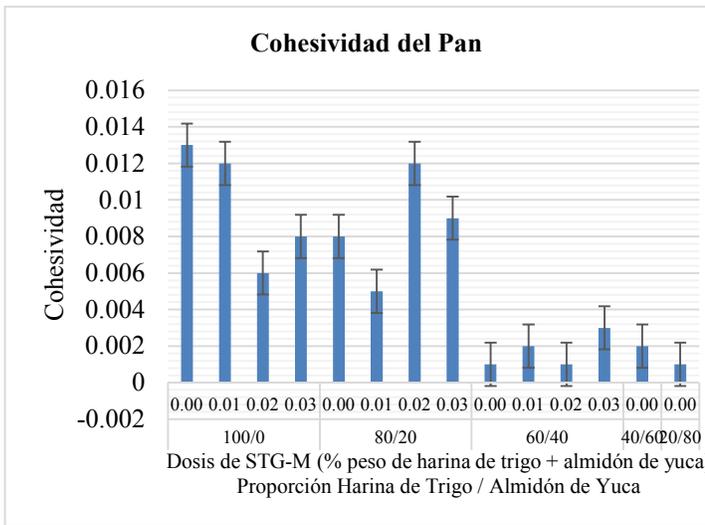


Figura 8. Valores de cohesividad del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

Adhesividad

Se refiere al trabajo necesario para despegar las muestras del pan de determinada superficie. Se encuentra que esta se incrementa conforme aumenta la sustitución parcial de harina de trigo (figura 9), a medida que mayormente la red de gluten integra almidón de yuca, la adhesividad de las muestras de producto terminado aumenta hasta un 720.45% de la adhesividad inicial. Este es el mismo comportamiento que se dará en la superficie del paladar.

La adición de transglutaminasa STG-M contribuye al incremento de la adhesividad característica de la miga de pan. En este caso los valores mayores, como lo indica la figura No. 10, se alcanzaron al utilizar dosis de STG-M por encima del 0.02% especialmente al sustituir del 40% al 60% de harina de trigo por almidón de yuca. La característica de una elevada cohesividad es muy deseable en el pan, porque se puede formar un bolo, más que desintegrarse durante la masticación [8].

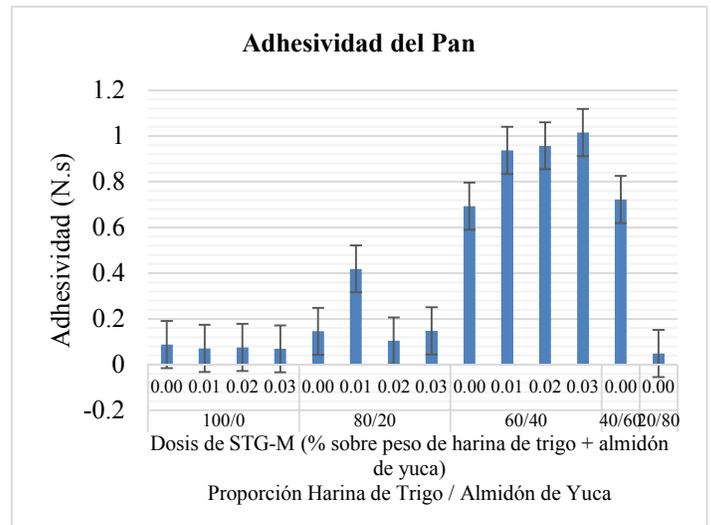


Figura 9. Resumen de resultados, adhesividad del pan.

Elasticidad

Los resultados para la elasticidad de las muestras como atributo de textura según el análisis de perfil de textura realizado se muestran en la figura 10, donde es notoria la disminución de los valores de elasticidad al reducir la proporción de harina de trigo en la formulación. Si bien estas masas mantuvieron un comportamiento reológico con calidad panadera (elástica y extensible) hasta un nivel de sustitución de harina de trigo de 40%, la elasticidad promedio de las muestras analizadas disminuyó en este punto en un 41.58%.

Un máximo en la elasticidad se alcanza al utilizar dosis de STG-M al 0.02% sobre peso total de harina de trigo y almidón de yuca. Lo anterior fue medido al realizar sustitución parcial de 20% y 40%.

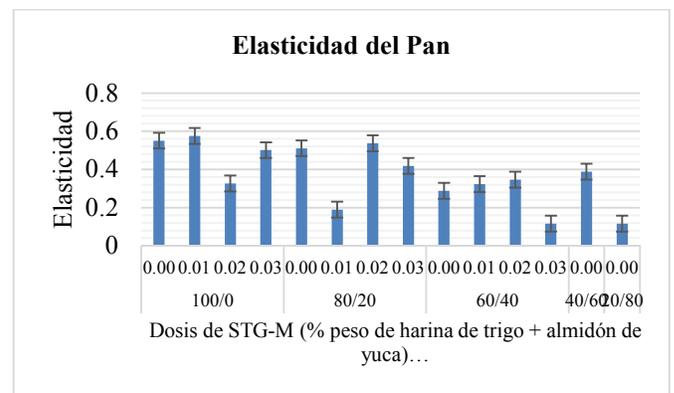


Figura 10. Valores de elasticidad del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

Gomosidad

La gomosidad se refiere a la energía requerida para desintegrar las muestras de pan antes de ser tragadas. En la figura 11 se ilustra una disminución en la gomosidad al reducir las partes de harina de trigo en las formulaciones analizadas. Esta disminución en la gomosidad de la miga resultante es característica del almidón de mandioca o yuca.

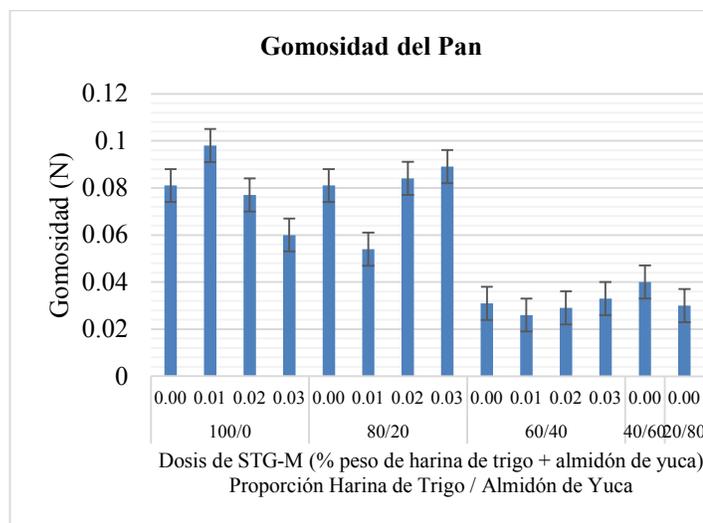


Figura 11. Resumen de resultados, gomosidad del pan.

Masticabilidad

Los datos obtenidos de masticabilidad a través del análisis de perfil de textura realizado representan el trabajo necesario para desintegrar las muestras de pan hasta que está listo para ser deglutido. Dicha masticabilidad disminuye en términos promedio de un 86.57% en las muestras con 0.00% de STG-M y almacenamiento congelado de 0 días al realizar sustitución de 40% de harina de trigo. A partir de ese punto se incrementa hasta un 58.70% de la masticabilidad de la muestra patrón. Estos resultados se pueden apreciar en la figura 12.

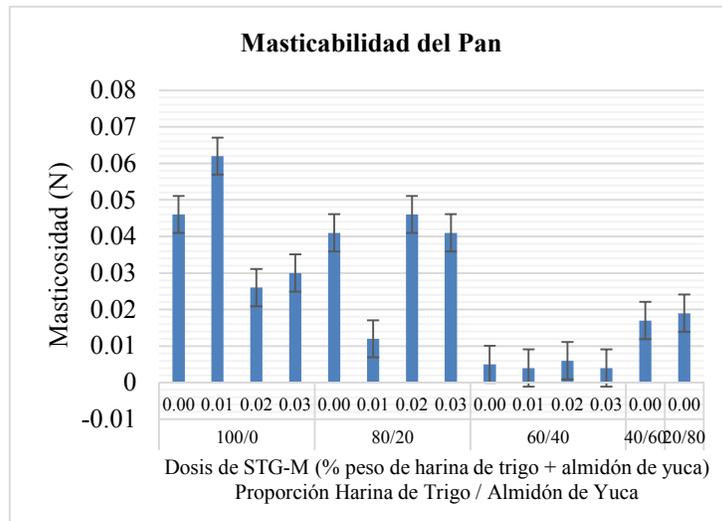


Figura 12. Resumen de resultados, masticabilidad del pan.

Resiliencia

Los datos obtenidos de la energía de deformación que las muestras pueden recuperar luego de su primera deformación entendida técnicamente como resiliencia, no logran establecer una tendencia significativa ($p < 0.05$) en cuanto al efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por almidón de yuca y el empleo de distintas dosis de enzima transglutaminasa STG-M.

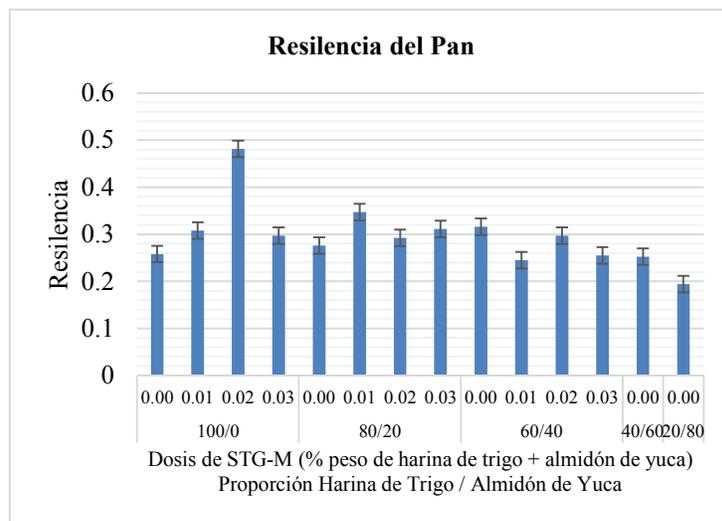


Figura 13. Resumen de resultados, resiliencia del pan.

Se realizó una correlación de los valores del perfil de textura en relación a las unidades de STG-M (figura 14), donde se muestra un máximo en el modelado potencial de la adhesividad al sustituir harina de trigo por almidón de yuca por encima del 60%; el resto de las propiedades graficadas decrecen al incrementarse el

recuento de unidades de enzima transglutaminasa por gramo de proteína calculado para cada formulación.

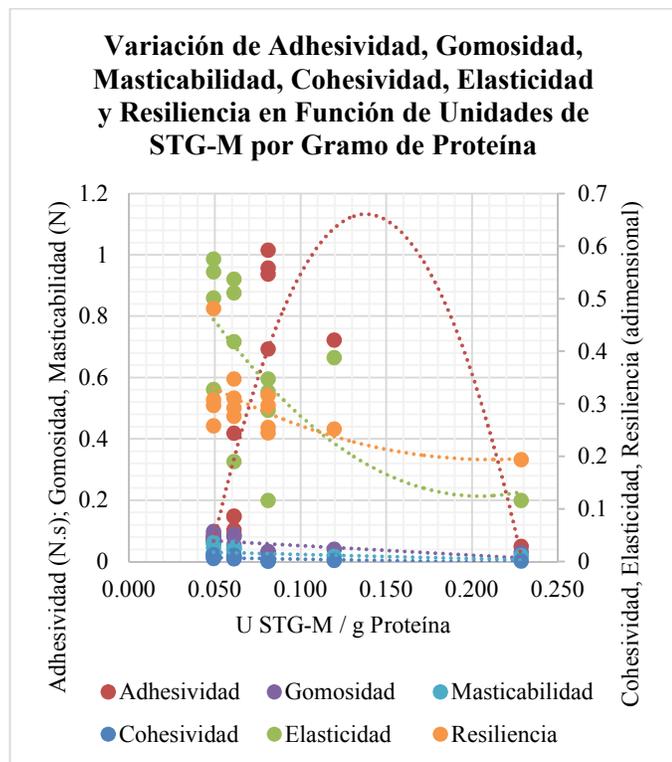


Figura 14. Correlación de atributos de textura en función de unidades de STG-M/gramo de proteína.

4. Conclusiones

El almidón agrio de yuca ha demostrado ser un sustrato pobre para la actividad de la enzima TG. La sustitución parcial de harina de trigo por almidón agrio de yuca es viable realizarla en un 20%. En estas muestras se midió un incremento en el volumen específico, indicador de mayor retención de gas durante el desarrollo de la masa originando una fracción alveolar conforme en las muestras con 20% de sustitución de harina de trigo que apenas disminuyó un 2.77% de la muestra control.

El uso de enzima transglutaminasa como mejorador de la estructura de la miga del pan es notorio al ser empleado en formulaciones dentro del rango de 0.01% y 0.02% por encima del peso de harinas y almidones. Entre las principales ventajas observadas y analizadas se encontraron: uniformidad en la distribución alveolar de la miga, se logró una estructura más resistente al desarrollo de la masa y mayor retención de gas de la que deriva un volumen en el producto final aceptable.

En función de un incremento en las unidades de STG-M por gramo de proteína los atributos de textura analizados mantienen un comportamiento distinto: la dureza y la fracturabilidad aumentan; por su parte la masticabilidad, gomosidad y cohesividad disminuyen linealmente mientras que la elasticidad y resiliencia modelan un descenso polinomial.

5. Agradecimiento

La empresa Riba Smith en Panamá proporcionó el acceso para el uso de sus instalaciones de la planta artesanal de pan. La empresa Ajinomoto donó gentilmente la enzima TGA utilizada para este estudio. En los laboratorios de Química Analítica de los laboratorios de la Facultad de Ciencias y Tecnología de UTP se llevaron a cabo los análisis fisicoquímicos, contando con la colaboración del Lic. Alejandrino Sevillano. El Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales (CEPIA) de UTP facilitó el uso del texturómetro para los análisis de textura instrumental, con la colaboración de la Ing. Kesia Barrows. Muchas gracias por el apoyo de estos colaboradores, empresas y Centro.

Actualmente la Dra. Franco es miembro del Sistema Nacional de Investigación-SNI- en la República de Panamá, bajo la Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT).

6. Referencias

- [1] Guía técnica para la producción y análisis del almidón de yuca. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1028s/a1028s02.pdf> [Consulta: 17 de agosto de 2014].
- [2] O. Tewe. "The global cassava development strategy. Cassava for livestock feed in sub-Saharan Africa". FAO Rome Forum. 2004.
- [3] C. Collar, C. Bollain y A. Angioloni. "Significance of microbial transglutaminase on the sensory, mechanical and crumb grain pattern of enzyme supplemented fresh pan breads". Journal of Food Engineering, vol. 70, pp. 479-488, October 2005.
- [4] M.E. Steffolani, P.D. Ribotta, G.T. Pérez, y A.E. León. "Effect of glucose oxidase, transglutaminase, and pentosanase on wheat proteins: Relationship with dough properties and bread-making quality". Journal of Cereal Science, vol. 51, pp. 366-373, May 2010.
- [5] J. Rossi Marquez, P. Di Pierro, M. Esposito, L. Mariniello, y R. Porta. "Application of transglutaminase-crosslinked whey protein/pectin films as water barrier coatings in fried and baked foods". Food Bioprocessing Technology, vol. pp. 447-455, February 2014.
- [6] AACC International. Approved Methods of Analysis. 11 ed. Method 10-05.01. Guidelines for Measurement of Volume by Rapeseed Displacement. 2000. AACC International, St. Paul, MN, U.S.A.

- [7] A. Pizzinato. “Qualidade da farinha de trigo: conceito, factores determinantes, parámetros de avilacao, e controle”. Apostila de curso. Chocotec-ITAL, Campinas, 1997.
- [8] M. Moore, M. Heinbockel, P. Dockery, H. M. Ulmer, y E. Arendt, E. “Network Formation in Gluten-Free Bread with Application of Transglutaminase”. *Cereal Chemistry*, vol. 83, pp. 28-36, February 2006.
- [9] M. Mohammadi, M.H. Azizi, T.R. Neyestani, H. Hosseini, y A.M. Mortazavian. “Development of gluten-free bread using guar gum and transglutaminase”. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 21, pp. 1398-1402, January 2015.
- [10] S. Jensen, L. Skibsted, U. Kidmose, and A. Thybo, “Addition of cassava flour in bread-making: sensory and textural evaluation”. *LWT-Food Science and Technology*, vol. 60, pp. 292–299, January 2015.
- [11] C. Onyango, C. Mutungui, G. Unbehend, M. Lindhauer. “Rheological and baking characteristics of batter and bread prepared from pregelatinised cassava starch and sorghum and modified using microbial transglutaminase”. *Journal of Food Engineering*, vol. 97, pp. 465-470, April 2010.
- [12] J. Smerdel, L. Pollak, D. Novotni, N. Cukelj, M. Benkovic, D. Lusic y D. Curic. “Improvement of gluten-free bread quality using transglutaminase, various extruded flours and protein isolates”. *Journal of Food and Nutrition Research*, vol. 51, pp. 242-253, December 2011.
- [13] M.T.P.S. Clerici, C. Airoidiu, y A.A. El-Dash. “Production of acidic extruded rice flour and its influence on the quality of gluten-free bread”. *LWT – Food Science and Technology*, vol. 42, pp. 618–623, March 2009.
- [14] J.A. Gerrard, S.E. Fayle, A.J. Wilson, M.P. Newberry, M. Ross y S. Kavale. “May Dough Properties and Crumb Strength of White Pan Bread as Affected by Microbial Transglutaminase”. *Journal of Food Science*, vol. 63, pp. 472–475, May 1998.

Aproximación espacial de concentraciones de gases productos de fuentes móviles de la ciudad de Panamá, utilizando sistemas de información geográfica

Spatial approximation of gas concentrations resulting from mobile sources in Panama City, using geographic information systems

María Singh ¹, José Fábrega ²

¹Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI), ²Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH)

¹maria.singh@utp.ac.pa, ²jose.fabrega@utp.ac.pa

Resumen— La contaminación atmosférica es la acumulación en el aire de concentraciones de diferentes sustancias que pueden ocasionar daños en los ecosistemas. La misma no es consecuencia única de la industrialización en o cerca de centros urbanos, también deben considerarse otros factores como el parque vehicular y la mala infraestructura vial. La preocupación por la contaminación atmosférica en Panamá surge a partir de los años 90, cuando la Ley No. 36 de 1996 estableció que el Instituto Especializado de Análisis (IEA) de la Universidad de Panamá (UP), tiene la obligación de instalar y mantener una red de medición de la contaminación del aire producida principalmente por motores de combustión interna, a nivel nacional. Panamá es considerada como la ciudad centroamericana con mayor índice de contaminación en el aire, esto debido al impacto que producen las emisiones generadas por el transporte. En este estudio se utilizó el Sistema de Información Geográfica (SIG) para analizar el comportamiento del ozono respecto a la densidad de población, con base en las áreas de influencia. Los datos de ozono se presentan en concentraciones promedios mensuales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Se confeccionaron mapas de contaminación de ozono y de densidad de población para los años 2005, 2008 y 2010. Se encontró que las zonas con densidades de población alta tienen mayores niveles de contaminación por ozono.

Palabras claves— Atmósfera, contaminación atmosférica, fuentes móviles, ozono, sistemas de información geográfica.

Abstract— Air pollution is the accumulation in the air of concentrations of various substances that can cause damage to ecosystems. It is not only a consequence of industrialization in or near urban centers, but also it is necessary to consider factors such as vehicle fleet size and poor road infrastructure. In Panama, the concern for air pollution comes from the 90s, with the approval of the law No. 36 of 1996 that established the Specialized Analysis Institute (IEA in Spanish) at the University of Panama (UP). This institute has the responsibility to install and maintain a network of stations to measure and analyze air pollution parameters at a national level, specially those produced by internal combustion engines. Panama is considered as the Central American city with the highest air pollution index, due to the impact produced by emissions from the transport sector (Swisscontact 1999). In this article, we analyzed the relationship between population density vs ozone, by employing Geographic Information System (GIS) over monthly averaged data in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, for 2005, 2008 and 2010. Influence zones of each one of the four monitoring station evaluated were also used. Finally, it was found that highest ozone concentrations were found in areas with highest population density.

Keywords— Atmosphere, air pollution, mobile sources, ozone, geographic information systems.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 24 de noviembre de 2015

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

1. Introducción

Cada vez que el hombre intenta mejorar su calidad de vida, genera grandes cambios en su entorno que traen como consecuencia diferentes tipos de contaminación.

Podemos decir que la contaminación atmosférica es la acumulación en el aire de sustancias que a ciertas concentraciones pueden ocasionar daños en ecosistemas y en nuestras sociedades. La contaminación atmosférica no es solo consecuencia de la industrialización, sino también producto de la movilidad urbana. Esto último en diversos aspectos, desde la utilización de combustibles no procesados, el aumento del parque vehicular y la mala infraestructura vial, hasta la falta de legislación en materia de calidad ambiental o la falta de aplicación de las leyes existentes.

Los contaminantes como el material particulado (PM), ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2), y el dióxido de azufre (SO_2), son considerados de riesgo a la salud en muchas ciudades de países en vías de desarrollo [1]. Estos contaminantes atmosféricos provocan afectaciones a la salud. Por ejemplo, el NO_2 es un gas tóxico causante de inflamaciones respiratorias, el SO_2 provoca en personas con asma cambios en la función pulmonar y síntomas respiratorios en períodos de exposición de 10 minutos, para concentraciones superiores a los $500 \mu g / m^3$ [2].

Los contaminantes atmosféricos aún en concentraciones bajas, son un problema serio para la salud. Las guías de calidad de aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) tienen directrices que son aplicables a nivel mundial y están basadas en evaluaciones científicas llevadas a cabo por expertos [2].

Los estados miembros de la OMS se agrupan en seis regiones u oficinas regionales (figura 1), estas son: África, Las Américas, Asia Sudoriental, Europa, Mediterráneo Oriental y Pacífico Occidental.

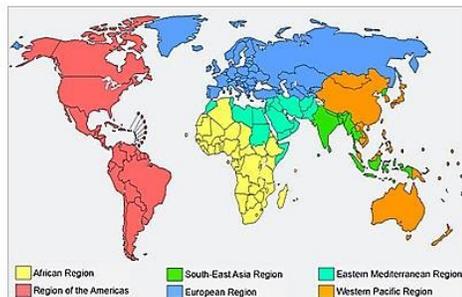


Figura 1. Regiones miembros de la Organización Mundial de la Salud.

Fuente: OMS [2].

Esta investigación busca evaluar si existe una relación entre las concentraciones del ozono troposférico versus la densidad de población en zonas urbanas, específicamente en la ciudad de Panamá. El ozono es un gas contaminante de la atmósfera, de gran capacidad oxidante. Ha recibido mucha atención debido a sus efectos negativos en la vegetación y especialmente en los seres humanos. Están bien documentados, los daños que ocasiona en las mucosas y vías respiratorias de los humanos [2]. Su presencia está relacionada con la concentración de NO_2 y el índice de Radiación Ultravioleta (indicador de radiación UV proveniente del sol en la superficie de la tierra) [3].

Uno de los primeros estudios realizados en la ciudad de Panamá en materia de contaminación atmosférica se realiza a través del proyecto aire puro 1993-2000 para América Latina y el Caribe llevado a cabo por la Agencia Suiza de cooperación para el Desarrollo Técnico [4]. En el mencionado estudio, la contraparte panameña estuvo liderada por el Instituto Especializado de Análisis (IEA) de la Universidad de Panamá (UP). Se encontró que más del 90% de la contaminación atmosférica en Panamá es debida a las emisiones vehiculares [4]. Se utilizaron datos basados en promedios mensuales, debido a la falta de personal especializado y al poco interés de las autoridades competentes para brindar el debido apoyo al IEA para que el monitoreo de cualquier gas contaminante se dé en mediciones a intervalos de tiempo más cortos. Esta información logró que se iniciaran cambios en la legislación panameña en materia de contaminación atmosférica [5]. La ley No. 36 de 1996 establece que el IEA se encargará de instalar y mantener una red de medición y análisis a nivel nacional, para verificar la contaminación del aire producida principalmente por los motores de combustión interna [5]. Estas estaciones se localizan en diferentes puntos de la ciudad de Panamá.

2. Marco teórico

El aire está conformado por una mezcla de gases, destacándose: el nitrógeno, el oxígeno y el vapor de agua. Entre las principales funciones del aire están: sostener la vida en la Tierra, transferir el sonido, filtrar y mitigar los rayos del sol, esparcir la luz y controlar cambios extremos de temperatura [6].

La atmósfera tiene un ciclo de limpieza de contaminantes. En este proceso de limpieza, la lluvia

juega un papel fundamental, precipitando al suelo las partículas suspendidas y disolviendo otros contaminantes [7]. También, al elevarse la temperatura, por ejemplo en horas del amanecer, el aire se calienta en la parte baja de la atmósfera, disminuyendo su densidad y por consiguiente, desplazándose hacia arriba y llevando consigo contaminantes a capas más altas de la atmósfera, iniciando el ciclo de limpieza [7].

2.1 La contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica puede definirse como la presencia en la atmósfera de gases, partículas y vapores que han sido introducidas directa e indirectamente al aire por el ser humano o por fuentes naturales en cantidades suficientes como para afectar negativamente a los animales, vegetación, materiales y al mismo ser humano [8]. En la actualidad, la contaminación atmosférica es en gran medida producto de actividades humanas. Esta se origina por la combustión de diferentes fuentes energéticas (entre ellos, carbón, petróleo, gas y leña) y las provenientes de fuentes móviles (autos, autobuses, camiones, barcos, aviones, etc.) [9].

2.2 El ozono

El ozono es el oxidante fotoquímico más abundante en la atmósfera. Sin embargo, el mismo no es emitido directamente a la atmósfera, sino que se forma por las reacciones químicas de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de luz solar [10].

El ozono y otros oxidantes fotoquímicos son irritantes; la exposición a niveles ambientales elevados de ozono puede ocasionar alteraciones en la función pulmonar [11]. La respiración rápida y poco profunda, la bronquitis y el enfisema se encuentran entre los efectos adversos a la salud más comunes que pueden presentarse como resultado de la exposición al ozono. Por otro lado, esta sustancia tiene una elevada capacidad para deteriorar el hule y otros materiales [11].

2.3 Tipos de fuentes de contaminación Móvil

Incluye principalmente el conjunto de pequeñas fuentes puntuales relativas a actividades del sector transporte (automóviles, camiones, aviones, autobuses, locomotoras, motocicletas, embarcaciones, ferrocarriles, tranvía, equipos y maquinarias con motores de combustión, etc.). Estas fuentes emiten contaminantes

peligrosos, debido a que los vehículos son los responsables de las emisiones de Carbono (CO_x) y de los compuestos volátiles como SO₂ y NO_x, generados mediante la combustión [12]. Sin embargo, por lo difícil que resulta analizarla como fuentes puntuales por su cantidad y movilidad, por lo general sus emisiones se consideran en función de un área.

Fija

Estas fuentes se caracterizan por tener poca o ninguna variabilidad espacial relativa al tiempo. Se clasifican en tres tipos: puntuales, de área y naturales.

Puntuales

Las que se genera de chimeneas de energía eléctrica, actividades industriales como textil, maderera, metálica, metalúrgica, manufacturera, procesadoras, etc. Ejemplos de éstas en Panamá tenemos Cervecería Nacional S.A., Industria Lácteas S.A., Coca Cola FEMSA, Central de Granos de Coclé S.A., Arosemena Técnica Agroindustrial S.A., Avícola Franz S.A., Conservas Panameña Selecta S.A., entre otras [12].

Área

Son plantas que generan emisiones dispersas en las actividades de procesos tales como: Consumo de solventes, limpieza de superficies industriales, lavado en seco, artes gráficas, panaderías, distribución y almacenamiento de gas licuado de petróleo, también incluye las plantas de tratamientos de aguas residuales, planta de abono orgánico, rellenos sanitarios, etc. [12].

Naturales

Son emisiones producidas por océanos, volcanes, incendios forestales, plantas, suspensión de suelos, emisiones emitidas por la actividad microbiana de suelo y océanos, emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales [12].

2.4 Estudios sobre Contaminación Atmosférica

Durante las últimas décadas las emisiones gases contaminantes de fuentes antropogénicas a la atmósfera han causado muchos problemas ambientales y de salud.

Dentro de estos problemas ambientales importantes que amenazan los ecosistemas y el bienestar de los seres humanos podemos mencionar: las quemadas de combustibles fósiles, contaminación al aire urbano, la lluvia ácida, la contaminación causada por sustancias químicas tóxicas, el agotamiento de la capa de ozono estratosférico y los cambios del sistema climático mundial [13].

En un estudio realizado por más de 100 expertos, donde se analizaron 14 regiones del mundo con el objetivo de conocer los factores ambientales que dañan la salud, se estimó que 1.3 millones de personas muere al año por causa de la contaminación atmosférica [14].

2.4.1 África

Este continente presenta grandes inconvenientes ambientales debido a la contaminación por químicos. Sus dos principales actividades económicas (la agricultura y la minería) se llevan a cabo de forma altamente contaminante y dañina. En África encontramos por año 500,000 trabajadores muertos (figura 2), debido a la contaminación química producida por pesticidas y químicos como el DDT (*Dicloro Difencil Tricloroetano*), prohibido en muchos países.

Estos químicos contaminan el aire, suelo, agua superficial y subterránea, flora y fauna. Además, entran residuos tóxicos desde el exterior, los cuales muchas veces no reciben un tratamiento adecuado, siendo acumulados y transformados en potenciales riesgos de contaminación ambiental [14].

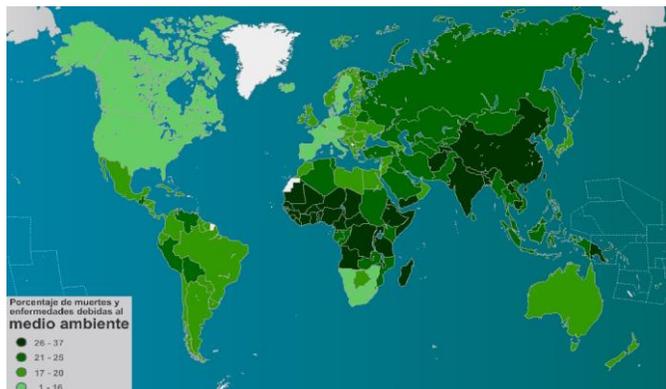


Figura 2. Mapa de la contaminación mundial.

Fuente: El Mundo [14].

Si se redujeran el nivel de partículas grandes (PM_{10}) y pequeñas ($PM_{2.5}$) presente en la atmósfera se podrían evitar 1.09 millones de todos esos fallecimientos provocados por la contaminación atmosférica. Vivir en ciudades cuyo aire no tiene unos mínimos de pureza genera un mayor riesgo de sufrir una enfermedad respiratoria o cardiovascular. Este fenómeno se da en los países con poco nivel de desarrollo debido al uso de combustible y carbón para realizar ciertas actividades de subsistencia [14].

2.4.2 América Latina

En el artículo titulado “Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina”, se discutió la problemática de la contaminación del aire en tres megaciudades: México, São Paulo y Santiago [15].

En particular se revisaron los programas de control de la contaminación atmosférica que han puesto en marcha los gobiernos de esas ciudades y la evolución de los niveles de contaminantes durante el periodo 1988-1995 en Santiago de Chile y São Paulo y hasta 1997 en la ciudad de México, con el objeto de evaluar el impacto de esos programas. En las tres megaciudades se observó un descenso en las concentraciones de PTS , PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO y O_3 durante el período mencionado. Cabe destacar que aunque la mayoría de los contaminantes siguen rebasando la norma de calidad del aire, el mayor impacto de estos programas ha sido sobre los niveles de SO_2 . Se recomienda el desarrollo de políticas de transporte sostenible. En este sentido, la Conferencia Europea de Ministros del Transporte, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) propusieron distintas estrategias tales como: el mejoramiento de los combustibles, la expansión del transporte colectivo y el control de emisiones en los vehículos automotores. Igualmente, la participación ciudadana es importante al tomar decisiones relacionadas con las políticas de transporte.

En la ciudad de México, se llevan a cabo medidas de control de la contaminación atmosférica, estableciéndose medidas de sustitución del combustible por gas natural y reduciendo el contenido de tetraetilo de plomo en las gasolinas. Adicionalmente, se puso en marcha el programa “Hoy no circula” por medio de verificación vehicular, entre otros. Esta medida de restricción vehicular ha sido aplicada en otros países como Chile, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Honduras, Venezuela [16].

En 1990, en Santiago de Chile se desarrolló un plan de descontaminación atmosférica que actúa en tres niveles: el plan maestro que define políticas y acciones globales que enmarcan el programa de descontaminación; el programa de emergencia de descontaminación atmosférica, para disminuir puntual y transitoriamente los niveles de emisión de la distintas fuentes y evitar daños a la salud durante episodios de alta contaminación atmosférica; y las acciones inmediatas, que obligaron a las industrias que emitían contaminantes a tomar medidas para reducirlos. [15].

En Sao Paulo se realizó un plan de control de la contaminación del aire para reducir las concentraciones ambientales de partículas totales en suspensión (PTS) y bióxido de azufre (SO₂) de emisiones industriales. Se buscó implementar una estrategia para que los combustibles fueran más limpios mediante programas de control de la contaminación por SO₂ [15]. Así mismo, se realizaron numerosas modificaciones en la composición de los combustibles que utilizan los vehículos automotores. Finalmente, se estableció que todos los modelos de vehículos nacionales e importados sean sometidos anual y obligatoriamente a homologación en cuanto a emisión de contaminantes [15].

2.4.3 América del Norte

El Informe realizado por la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) contiene un extenso horizonte global de la contaminación industrial de América del Norte. En este se muestra evidencia de registros de emisiones y traslado por 5700 millones de kilogramos de contaminantes tóxicos en 2006 de plantas industriales en Canadá, Estados Unidos y México [17]. Un estudio de la NASA dirigido reveló que al año llegan del Océano Pacífico millones de toneladas de polvo con contaminantes y otras partículas. Este fue el primer estudio basado en mediciones de cantidad de partículas en el aire, llamadas aerosoles, que llegan a América del Norte [18].

La contaminación del aire en México ha disminuido considerablemente en las últimas dos décadas. Sin embargo, en muchas ciudades mexicanas los niveles de contaminantes nocivos, como material particulado y ozono, todavía permanecen por encima de los niveles recomendados por la OMS [17]. Doce de las quince ciudades del mundo con los niveles más elevados de material particulado están situadas en Asia; en donde, seis de esas ciudades tienen los niveles más elevados de SO₂ atmosférico [19]. Los niveles de contaminación superan substancialmente las directrices internacionales en materia de calidad del aire recomendadas por la OMS. Ciudades como Beijing, Calcuta, Yakarta, Nueva Delhi, Shanghái y Teherán son notorias por sus altos niveles de partículas en suspensión. Nueva Delhi ocupa el primer lugar como la ciudad con el nivel más elevado de SO₂ atmosférico, alcanzando un máximo de 420 µg/m³ [19].

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) anunció en agosto del 2012, la formación de una gigantesca nube tóxica sobre Asia, producto de décadas de contaminación sin medida. Esta capa de contaminación, densa y permanente en el continente asiático, desde el océano Pacífico hasta el océano Índico, ha recibido el nombre científico de Nube Asiática Marrón o “ABC” (*Asian Brown Cloud*, por sus siglas en inglés) [20].

La preocupación sobre el medio ambiente en este continente inicio en los años 80, excluyendo los países desarrollados de las subregiones de Asia Nororiental y partes del Pacífico Meridional [20]. Para los años noventa se tenían avances relevantes como la creación de instituciones e importantes normativas para enfrentar los problemas ambientales urgentes [20]. Con el fin de disminuir sus emisiones, muchos países de la región están usando gasolina sin plomo, convertidores catalíticos obligatorios y combustibles con bajo contenido de azufre. En India e Irán por ejemplo, se está considerando la utilización de tecnologías alternativas, como vehículos eléctricos o los que funcionan con gas comprimido. Por otro lado, Nepal y Pakistán han aprobado incentivos fiscales para alentar el uso de vehículos a gas o a baterías [21].

2.4.4 Europa

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente la contaminación atmosférica en Europa está asociada a efectos nocivos sobre la salud y el medio ambiente debido a las concentraciones de contaminantes atmosféricos que siguen elevando los problemas de la calidad del aire. La población vive en zonas urbanas donde los niveles de calidad del aire son elevados por contaminantes como ozono, dióxido de nitrógeno y material particulado [22]. Encontramos en APHEIS, un estudio presentado por la revista The Lancet en el 2000 donde dice que hay tres países europeos donde fallecen entre 19000 a 44000 personas a causa de los efectos de esta contaminación [22]. Por lo cual la contaminación atmosférica sigue siendo una amenaza para la salud pública en Europa, a pesar de las normas estrictas en cuanto a materia de emisiones se refiere. Es interesante mencionar un estudio publicado en 1999, en donde se evalúan los “Efectos de la Contaminación Atmosférica sobre la Salud” [23]. Este estudio en su fase inicial contó con la participación de 15 ciudades europeas pertenecientes a 10 países. En su segunda fase incluye 34 ciudades. Específicamente en España se realizaron

proyectos como: EMECAM que analiza los efectos de la contaminación atmosférica fundamentalmente sobre la mortalidad y el proyecto EMECAS sobre la morbilidad [23].

3. Metodología

El principal objetivo de este estudio fue evaluar la relación existente entre la densidad de población y el ozono. Se asumió que la densidad de vehículos se relacionaba con la densidad de vehículos. La realización de un modelo de dispersión fue descartada debido a la poca información detallada existente. Por ejemplo, para los contaminantes la información debe ser recolectada diariamente y la información de tráfico vehicular de registro esta por distrito, necesiándose por corregimientos. Nuestro alcance se limitó al ozono debido a que era el único contaminante que mantenía un registro completo en al menos tres años entre el 2005 al 2010.

3.1 Selección de información

El distrito de Panamá, está conformado por 23 corregimientos (figura 3). La ciudad de Panamá está inmersa en el distrito Panamá y la conforman 15 de estos corregimientos (figura 4).

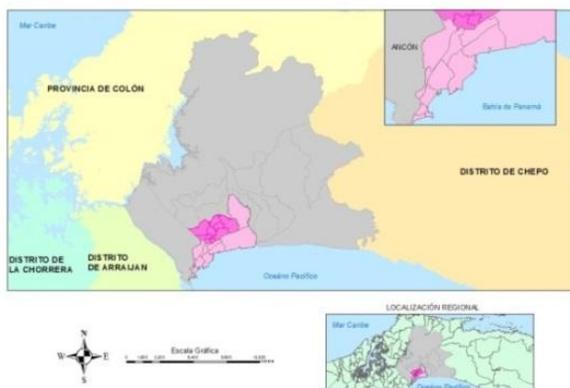


Figura 3. División política administrativa de la Provincia de Panamá. Año 2010. Fuente: Contraloría General de la República de Panamá.

En el distrito de Panamá existen cinco estaciones de monitoreo del ozono y una en el distrito de San Miguelito. Se escogieron 4 estaciones, 3 de la ciudad de Panamá y 1 del distrito de San Miguelito. Las estaciones seleccionadas están en los corregimientos de San Felipe (Casco Antiguo); Bella Vista (Universidad

de Panamá); Juan Díaz (Hipódromo) y en el Corregimiento Victoriano Lorenzo (figura 5).

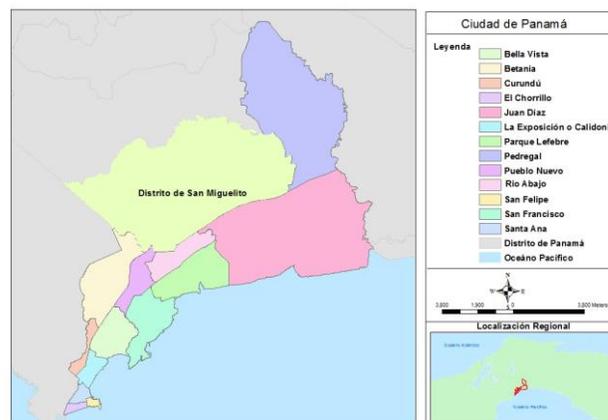


Figura 4. Corregimientos que conforman la ciudad de Panamá. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Contraloría General de la República. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Contraloría General de la República de Panamá.

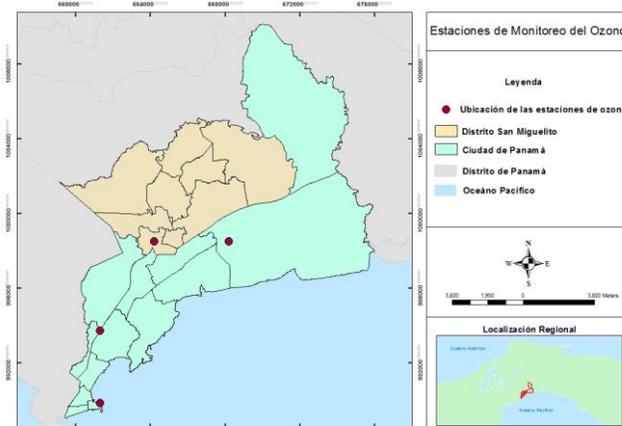


Figura 5. Ubicación de las Estaciones de Monitoreo de ozono.

3.2 Uso de Sistemas de Información Geográfica

Las figuras 6 y 7 muestran la construcción del polígono global de estudio a partir de los corregimientos que comprenden la ciudad de Panamá con el programa ArcGIS. Se utilizó la herramienta *Merge* (mezclar), la cual crea un archivo nuevo a partir de varios archivos de entrada de iguales características, y espacialmente adyacentes. Para mantener la consistencia en los resultados, los campos de las tablas de atributos deben

estar configurados homogéneamente en los archivos implicados.

El resultado es un polígono que servirá de base para realizar otras funciones de análisis espacial. Este polígono define las áreas de influencia de las estaciones empleadas. Luego, se realizó un geoprocesamiento, a través de la ventana *ArcToolbox*, se ubicaron el grupo de herramientas de *Analysis Tools* para realizar distintos procesos de análisis espacial. Aquí, colocándolos sobre la opción *Proximity*, se escoge la función *Create Thiessen Polygons* (figura 8).

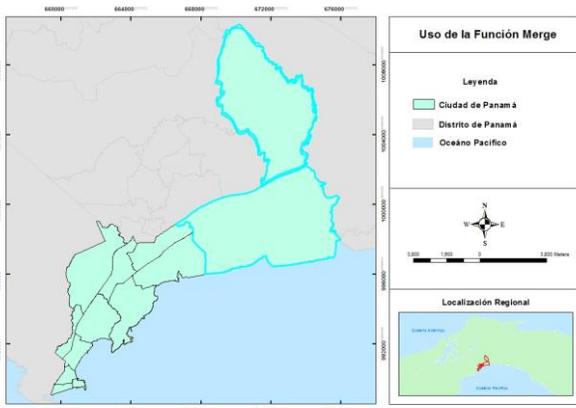


Figura 6. Geoprocesamientos de los SIG, utilizando la herramienta *Merge*. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Contraloría General de la República y los geoprocesamientos del *ArcMap 10.3*

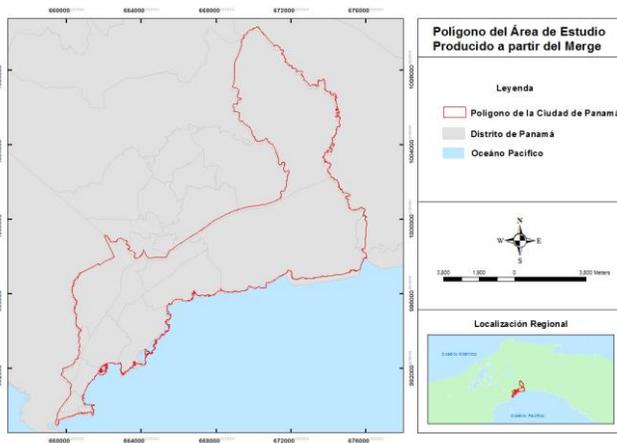


Figura 2. Delimitación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Contraloría General de la República y los geoprocesamientos del *ArcMap 10.3*.

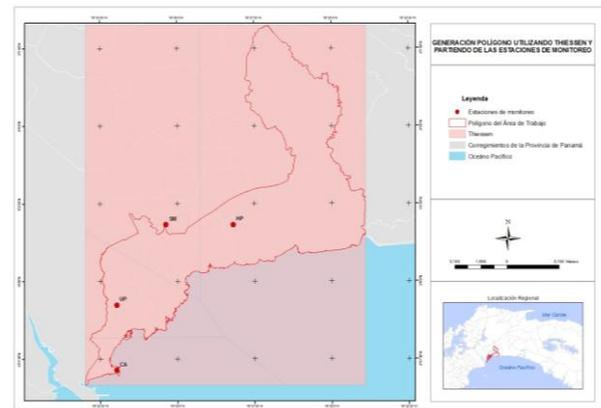


Figura 3. Generación de Polígonos con la aplicación *thiessen* a partir de serie de puntos de control (estaciones). Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Contraloría General de la República y los geoprocesamientos del *ArcMap 10.3*.

Los polígonos de *Thiessen* son métodos de interpolación simple basados en la distancia euclidiana. Se emplean particularmente cuando los datos son cualitativos. Los polígonos son creados al unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control. De esta forma, el perímetro de los polígonos generados es equidistante a los puntos vecinos y de esta manera se diseña el área de influencia.

El método de los polígonos de *Thiessen* en *ArcGIS* cumple esta función, delimitar áreas de influencia a partir de un conjunto de puntos. El tamaño y la configuración de los polígonos dependen de la distribución de los puntos originales. Estas zonas representan áreas completas donde cualquier ubicación dentro de la zona está más cerca de su punto de entrada asociado que a cualquier otro punto de entrada.

En determinadas las zonas de influencia, se procedió a realizar un corte con el objeto de trabajar exclusivamente sobre el área de estudio. Este paso empleó la función *CLIP* (cortar) de *ArcGIS*. La función *CLIP* (*ArcToolBox* – *Analysis Tools* – *Extract*), permite cortar una capa de información según el perímetro definido por el contorno de otra capa, almacenándose el resultado en un nuevo archivo. El archivo de entrada pueden ser puntos, líneas o polígonos. El archivo utilizado para cortar, debe ser de polígonos. Con los resultados de la Figura 8, y agregando la capa de

corregimientos para definir el área de los mismos para los correspondientes cálculos de densidad de población, obtuvimos aplicando la herramienta *CLIP*, el área de estudio con sus respectivos polígonos.

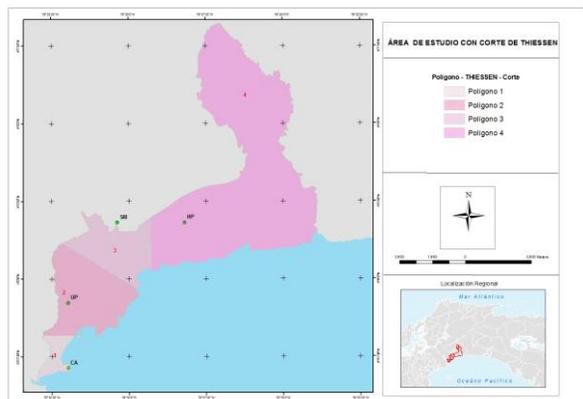


Figura 4. Máscara de corte en el área de estudio.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Contraloría General de la República y los geoprocесamientos del ArcMap 10.3.

Se procedió a usar la función *CLIP*, junto con la capas generadas por *Thiessen* para hacer un nuevo corte y generar áreas correspondientes a cada polígono como apreciamos en la figura 9. Este corte nos permitió calcular el área de cada polígono y la densidad de población de los mismos.

4. Resultados

A partir de la información de la Figura 9, se calculó la población correspondiente a cada zona de influencia, con lo cual se generaron los Mapas de Ozono vs Densidad de Población para cada año.

Se asumió que la densidad de población está estrechamente relacionada al número de vehículos. Con esta premisa, se pudo analizar el comportamiento de estas variables para poder determinar si cumplen o no con la hipótesis.

4.1 Mapas de Ozono vs Densidad de Población

Tal como mencionamos, se asumió que la densidad de población está estrechamente relacionada al número de vehículos. Con esta premisa, se pudo analizar el comportamiento de estas variables para poder determinar si cumple o no con la hipótesis.

4.2 Descripción de resultados

Para el año 2005 (figura 10), el polígono 1 tiene alta concentración de ozono registrado, coincide con una densidad de población también alta. El polígono 2 por su parte muestra una densidad de población media, y refleja una contaminación por ozono media; al igual que el polígono 3 y en el polígono 4 a pesar de tener una densidad de población baja la contaminación por ozono es alta tomando en cuenta que el polígono 4 está conformado por los corregimientos Pedregal, Juan Díaz, parte de Parque Lefevre (40%) y Río Abajo (71%) y la cantidad de vehículos (44,453) que circulaba en este polígono N.º 4 influenciado por la estación de monitoreo de ozono del Hipódromo.

Tabla 1. Concentración de ozono ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Polígono	Año			Área (Km^2)
	2005	2008	2010	
N.º				
P1	18.47	13.55	13.83	0.35
P2	11.06	7.7	9.54	17.59
P3	10.19	7.22	9.49	12.35
P4	16.98	12.61	12.86	70.05

Donde: μg = microgramos, m = metros.

La tabla 1 presenta la concentración de ozono por polígono de estudio para los años 2005, 2008 y 2010. Esta información sirvió de insumo para la creación de los mapas de Densidad de Población vs. Ozono.

Tabla 2. Densidad de Población (Hab./Km^2)

Polígono	Años		
	2005	2008	2010
No.			
P1	23670	23685	23695
P2	6599	6812	7156
P3	6151	6251	6310
P4	2609	2730	3167

Donde: Hab. = habitantes, Km = kilómetros.

La tabla 2 presenta la Densidad de Población (Hab./Km^2).

Para el año 2008 (figura 11), el polígono 1 tiene alta densidad de población y contaminación por ozono alta; el polígono 2 tiene media densidad de población y contaminación por ozono bajo; al igual que el polígono 3, esto puede ser por causa de la deficiencia de transporte colectivo y selectivos, que lleva a la población a utilizar su propio auto. El polígono 4 para

este período tiene una densidad de población media y contaminación por ozono baja. Este comportamiento se debe al mismo fenómeno del polígono 2 y 3.

En el año 2010 (figura 12), el polígono 1 tiene una densidad de población alta al igual que su nivel de contaminación; el polígono 2 tiene una media densidad de población y un nivel bajo de contaminante por ozono; el polígono 3 tiene una densidad de población media y un nivel de contaminante bajo y el polígono 4 tiene una densidad de población baja y un nivel medio de contaminación por ozono.

El incremento urbano que se ha dado en la ciudad de Panamá, el mal estado y mala administración de autobuses obliga al panameño a depender de automóviles propios para su traslado, generando así más contaminación al aire y sobre todo en las horas pico.

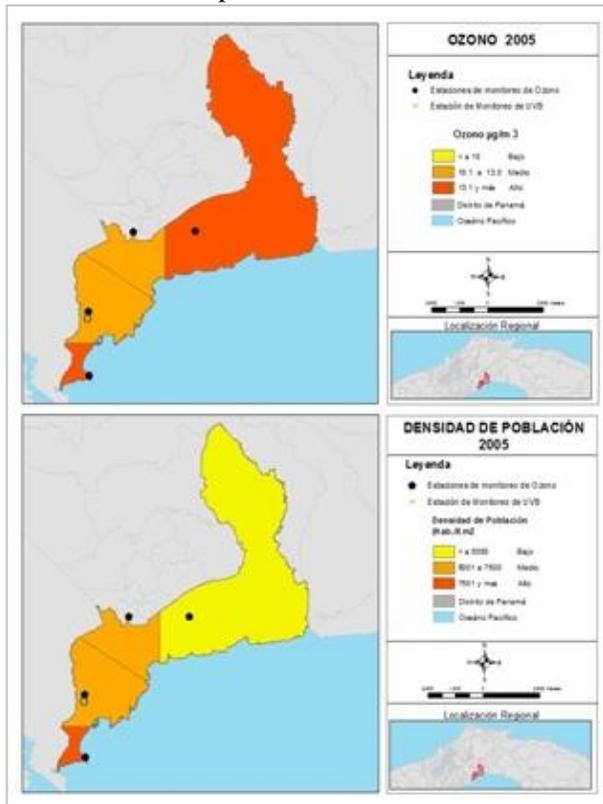


Figura 5. Ozono VS Densidad de Población. Año 2005.

4.3 Análisis de resultados

En la ciudad de Panamá, como en muchas otras ciudades del mundo se ha dado un crecimiento económico, urbano ligeramente vinculado a la industria de la construcción y servicios, guardando una inmensa relación con maquinarias automotoras, equipos pesados, trayendo como resultado consumo de combustibles fósiles generando grandes volúmenes de contaminantes que reaccionan con las condiciones ambientales del entorno y pueden traer daños al hombre, ecosistemas, recursos naturales etc.

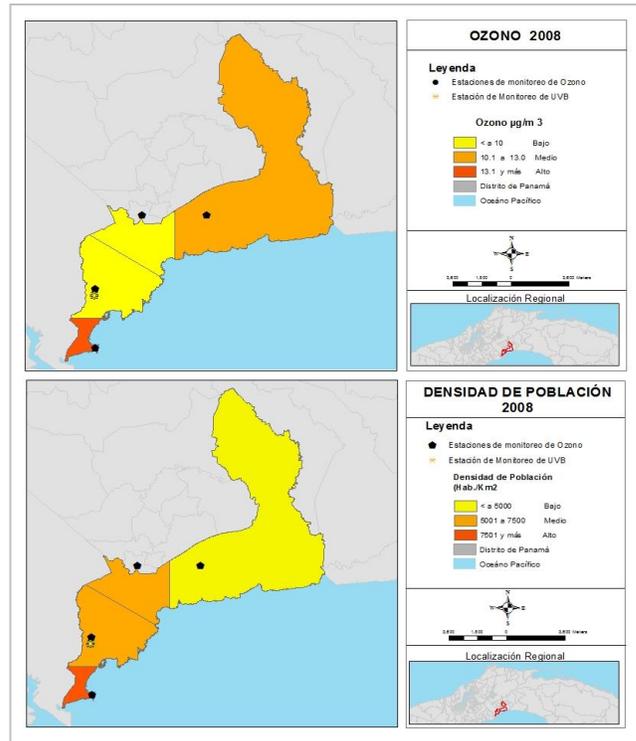


Figura 6. Ozono VS Densidad de Población. Año 2008.

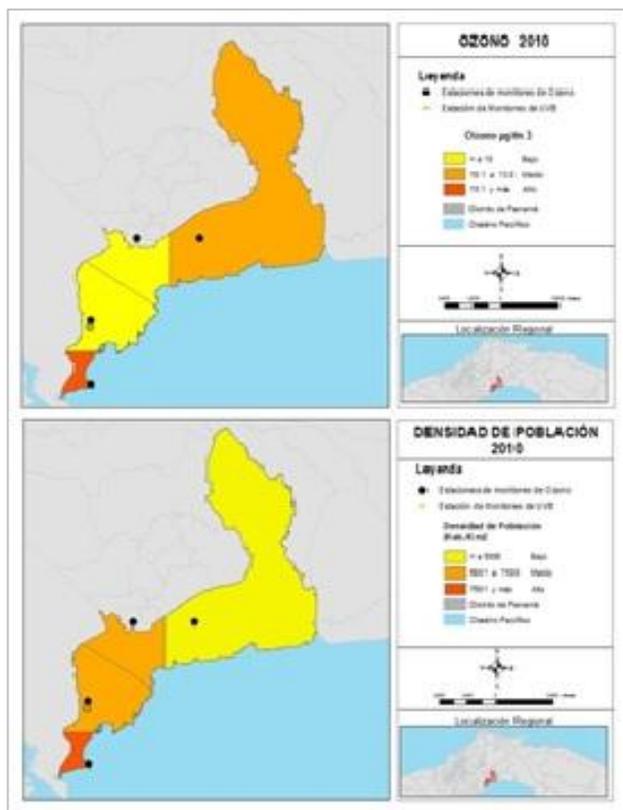


Figura 7. Ozono VS Densidad de Población. Año 2010.

Aunque hoy día es a todas horas debido a los trabajos de mejoramiento urbano el tranque se ha apoderado de nuestras calles y esto para en contaminantes al aire por el tipo de combustibles que utilizamos y no solo esto también tenemos los contaminantes de material particulado con todas estas construcciones que se están dando.

5. Conclusiones

Podemos decir que el comportamiento dado en el polígono 1, área de estudio influenciada por la estación del casco antiguo se da por diversos factores como la mayor densidad de población y asentamientos urbano, lo cual contribuye a una mayor contaminación atmosférica que se refleja en las concentraciones más elevadas de los contaminantes estudiados.

En nuestra ciudad el incremento del parque automotor y el recorrido de los mismos han ido en crecimiento acelerado durante los últimos años, este incremento aporta más contaminantes atmosféricos la necesidad del uso de automóvil como medio de transporte debido al mal servicio que tenemos.

6. Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud. “Calidad del aire (exterior) y salud.” Internet: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>, marzo, 2014 [julio 13,2011].
- [2] Organización Mundial de la Salud (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. [En línea]. Disponible: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf [julio 23, 2011].
- [3] Organización Mundial de la Salud (2003). *Índice UV solar mundial: guía práctica*. Recomendación conjunta de: Organización Mundial de la Salud, Organización Meteorológica Mundial, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante. [En línea]. Disponible: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/42633/1/9243590073.pdf> [julio 27, 2011].
- [4] B. Lang & R. Majano. El impacto ambiental de los medios de transporte en Centro América. Geneva, Switzerland: SWISSCONTACT. (1999).
- [5] Autoridad Nacional del Ambiente de Panamá (2006).Anteproyecto de Norma de Calidad de Aire Ambiente. Dirección Nacional de Protección de la Calidad Ambiental (DINAPROCA_ANAM) & URS Holdings. [En línea]. Disponible:http://www.capac.org/images/ambiental/legislacion/anteproyecto_norma_calidad_aire_ambiente.pdf [agosto4, 2011].
- [6] B. Veritas. *Manual para la Formación en Medio Ambiente*. Valladolid, ES: Lex Nova, 2008, pp. 152-166.
- [7] J. Garmendía y M. R. Fidalgo. (1990, Marzo). “Influencia de la precipitación sobre las concentraciones de SO₂ y humos de la atmósfera de Salamanca.” *Revista de Meteorología A.M.E.* [En línea]. pp. 33-37. Disponible: http://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/2197/1/TyC_1990_13_05.pdf [enero 27, 2012].
- [8] M. Alfaro. *Contaminación del Aire: Emisiones Vehiculares, Situación Actual y Alternativas*. San José, CR: Universidad Estatal a Distancia San José, 1998, pp. 1-25.
- [9] E. Martínez. *Química II: con Enfoque en Competencias*. MX: Cengage Learning Latin America, 2008, pp. 49-58.
- [10] M. Zuk, M. Tzintzun y L. Bracho. *Tercer Almanaque de Datos y Tendencias de la Calidad del Aire en Nueve Ciudades Mexicanas*. México DF, MX: Instituto Nacional de Ecología, 2007, pp. 1-114.
- [11] Instituto Nacional de Ecología - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Guía de Elaboración y Usos de inventarios de emisiones*. MX: INE-SEMARNAT, 2005.

- [12] Instituto Nacional de Ecología. *Tratamiento Biológico de Compuestos Orgánicos Volátiles de Fuentes Fijas*. MX: INE, 2003, pp. 1-70.
- [13] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial 2002 GEO-3*. Nairobi, Kenya: PNUMA, 2002, pp. 210-239.
- [14] A. López. “La OMS publica el primer mapa de la contaminación mundial.” *El Mundo*. Internet: www.elmundo.es/elmundosalud/2011/09/26/noticias/1317036029.html, sep. 26, 2011 [julio 27, 2012].
- [15] M. Lacasaña-Navarro, C. Aguilar-Garduño, and I. Romieu, “Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina,” *Salud Pública Mex.*, vol. 41, no. May, pp. 203–215, 1999.
- [16] Gobierno del Estado de México. Secretaría del Medio ambiente (2012, junio). *Programa de Restricción Vehicular "Hoy No Circula" y similares en el mundo. Sus alcances y limitaciones*. [En línea]. Disponible: <http://docplayer.es/7927049-Programa-de-restriccion-vehicular-hoy-no-circula-y-similares-en-el-mundo-sus-alcances-y-limitaciones.html>. [Octubre 21, 2013].
- [17] Teorema Ambiental, Revista Técnico Ambiental. “Sectores industriales los más contaminantes de América del Norte.” Internet: http://www.teorema.com.mx/contaminacion_/sectores-industriales-los-mas-contaminantes-de-america-del-norte/. Jul. 14, 2010 [Febrero 14, 2014].
- [18] A. Gubin. “El 50% de la contaminación en América del Norte proviene del Pacífico.” Internet: <http://www.lagranepoca.com/archivo/25205-50-contaminacion-america-del-norte-proviene-del-pacifico.html>, Ago. 3, 2012 [abril 18, 2013].
- [19] C. Guajardo, “Entidades Normativas a Nivel Mundial.” Internet: http://es.slideshare.net/bio_claudia/entidades-normativas-anivelmundial-nms, Oct. 8, 2012 [mayo 30, 2013].
- [20] F. Ojeda. “Bajo la nube.” Internet: <http://es.slideshare.net/FdaOjeda/bajo-la-nube-solucin-contaminacion-china>, jun. 22, 2014 [Diciembre 16, 2014].
- [21] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA. (2007). *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial GEO4 medio ambiente para el desarrollo*. [En línea]. Disponible: <https://es.scribd.com/document/1307671/Perspectivas-del-Medio-Ambiente-Mundial-2007> [Febrero 3, 2014].
- [22] S. Medina, A. Plasència, Grupo APHEIS (2001). *Presentación de APHEIS Contaminación del Aire y Salud: Un Sistema Europeo de Información Contaminación del Aire y Salud Pública en Europa: Cuestiones clave*. [En línea]. Disponible: http://www.osakidetza.euskadi.eus/r85-cksalu10/es/contenidos/Informacion/sanidad_ambiental/es_1249/adjuntos/aire/apheis_bilbo_c.pdf [junio 19, 2014].
- [23] I. Galán (2005). “Efectos de la contaminación atmosférica sobre la mortalidad y morbilidad por enfermedad respiratoria en la ciudad de Madrid.” *Revista de Patología Respiratoria*. [En línea]. 8(2). pp. 201-202. Disponible: http://www.Revistadepatologiarrespiratoria.org/descargas/pr_8-2_201-202.pdf [Noviembre 7, 2014].

Optimización de una red para una casa inteligente basada en IEEE 802.15.4g para una infraestructura de medición avanzada

Optimizing a network for smart home based on IEEE 802.15.4g for advanced metering infrastructure

Maricela Alexandra Arciniega Calderón¹, Nelson Andrés Ayala Arciniegas¹, Esteban Mauricio Inga Ortega¹

¹Universidad Politécnica Salesiana

marciniega@est.ups.edu.ec, nayala@est.ups.edu.ec, einga@ups.edu.ec

Resumen– En el presente artículo se expone la optimización de la infraestructura y elementos que intervienen en la comunicación y transmisión de información. En el modelo se minimizará el número de Puntos de Acceso Inalámbrico (WAP), teniendo en cuenta restricciones de capacidad, cobertura e interferencia con tecnología LTE en un sistema WLAN para una red de sensores IEEE 802.15.4g bajo el concepto de Smart Home mediante la utilización de softwares Matlab y LPSolver, se presenta una formulación matemática, la cual se utilizará para la ubicación de un conjunto de Puntos de Acceso Inalámbrico que otorgan cobertura a los Dispositivos Inteligentes la utilización del software LPSolver facilitará la resolución de ecuaciones llegando a proporcionar una reducción de tiempos y recursos para el estudio de diseño en Smart Metering, mediante la ejemplificación de problemas reales que son de gran relevancia para condiciones de diseño de redes inalámbricas, aplicando una topología jerárquica.

Palabras claves– Capacidad, casa inteligente, cobertura, infraestructura de medición avanzada, interferencia, optimización, redes eléctricas inteligentes.

Abstract– This article describes the optimization of infrastructure and elements involved in the communication and transmission of information. In the model will minimize the number of points of wireless Access-Point (WAP), taking into account restrictions on capacity, coverage and interference with LTE technology in a WLAN system for a network of sensors IEEE 802.15.4g under the concept of Smart Home through the use of software Matlab and LPSolver, presents a mathematical formulation, which will be used for the location of a set of wireless Access-Point that give coverage to the smart devices using the software LPSolver will facilitate the resolution of equations to provide a reduction of time and resources for the study of design in Smart Metering, through the exemplification of problems which are of great importance for design conditions of wireless networks, applying a hierarchical topology.

Keywords– Capacity, Smart home, coverage, Advanced Metering Infrastructure, interference, optimization, Smart Grid.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 1 de febrero de 2016

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

1. Introducción

Este trabajo presenta los estudios de optimización basados en la colocación dinámica de puntos candidatos para *Access-Point (AP)*, cuyos resultados se obtienen por medio de los algoritmos basados en el análisis de diseño de redes de comunicaciones.

Las redes inalámbricas permiten la interconexión entre dos o más puntos, por medio de las ondas que viajan a través del espacio llevando la información entre mecanismos de comunicación, una de las formas de transmisión más efectiva de datos es a través de una antena la cual será estación de servicio donde esta tendrá conexiones de fibra óptica para realizar un *Smart*

Grid con el objetivo de administrar de manera eficiente los datos hacia los dispositivos que se acoplarán a la antena.

En una red inalámbrica sus usos no tienen límites ya que se puede realizar sistema de información, sistemas de control, sistemas de comunicación, sistemas de vigilancia, etc [1].

En la medición inteligente el intercambio bidireccional de información entre las empresas de distribución y los usuarios, facilita la construcción de una red inteligente [2].

Los medidores de energía son equipos sólidos con una robustez en sus protocolos de comunicación para una alta confiabilidad en sus sistemas de medición y de seguridades de las redes [3-4].

En la última década con el avance de las comunicaciones, las organizaciones se han visto en la necesidad de entregar soluciones efectivas para diferentes áreas, como dispositivos de control, gestión de energía, casas eficientes, sector comercial, dispositivos de consumo electrónico, en la construcción e industrias [5].

El avanzar hacia la gestión inteligente de la energía requiere no solo cambios en la forma de suministrar la energía sino también, la forma en la que se controla y se medirá la energía para evitar las pérdidas. *ZigBee* es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar *IEEE 802.15.4* de redes inalámbricas de área personal [6]. *ZigBee* para el control de dispositivos y la gestión de la energía incluye redes de áreas residenciales para la energía, para el uso de sub-energías dentro de una casa o apartamento y comunicación de los dispositivos dentro del hogar. Las iniciativas de estandarización internacional también están jugando su papel en especificar estándares industriales aplicables a nivel mundial [7-8].

La *IEEE 802.15.4g Smart Utility Networks (SUN)* es un pionero de su tipo para especificar un estándar global que facilita el proceso de la escala muy grande de aplicaciones de control capaz de soportar grandes y diversas redes con potencialmente millones de terminales fijos [9]. Estas soluciones deberían integrarse como un solo ecosistema.

Existen tres tipos de transacciones de transferencia de datos. El primero es la transferencia de datos a un

coordinador en el que un dispositivo transmite los datos. La segunda operación es la transferencia de datos de un coordinador en el que el dispositivo recibe los datos. La tercera transacción es la transferencia de datos entre dos dispositivos de pares [10-11].

En la topología de estrella, se usan solo dos de estas transacciones porque los datos solo podrán ser transmitidos entre el coordinador y un dispositivo. En una topología de punto a punto, los datos pueden ser intercambiados entre dos dispositivos en la red. La *IEEE 802.15.4 LR-WPAN* emplea diversos mecanismos a mejorar la probabilidad de transmisión de datos con éxito, estos mecanismos son los *CSMA-CA*. Cuando el coordinador desea transferir datos a un dispositivo en una HAN habilitado se indica en la baliza de red que está pendiente el mensaje de datos. El dispositivo escucha periódicamente a la baliza de la red y, si un mensaje es pendiente, transmite un comando que solicita la *MAC* de datos, utilizando *ranurado CSMA-CA*. El coordinador reconoce la recepción exitosa de la petición de datos mediante la transmisión de una trama de confirmación. Luego se envía la trama de datos en espera usando *ranurado CSMA-CA* o, si es posible, inmediatamente después de la reconocimiento[12].

La figura 1 representa la idea conceptual de una red doméstica (*HAN*), donde sensores en aparatos se comunican de forma inalámbrica entregando la información del uso y el medidor inteligente conecta la casa con la red inteligente de intercambio bidireccional de información.

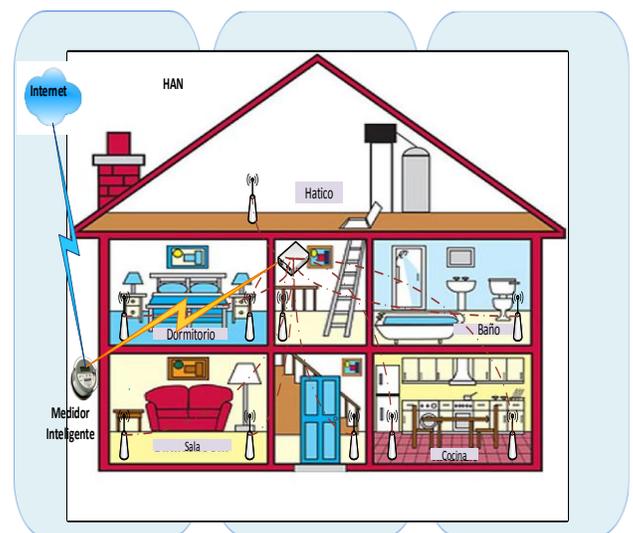


Figura 1. Red de área doméstica.

2. Infraestructura de medición inteligente

Al grupo de tarea *IEEE 802.15.4g SUN* se da la responsabilidad de especificar una enmienda de capa física (*PHY*) y modificación de capas de control (*MAC*) relacionados con acceso al medio [9].

El ámbito principal de *802.15.4g* es proporcionar un estándar global que facilita aplicaciones de control de proceso a muy gran escala tales como la *smart grid network* con gran capacidad de soporte [9].

Al inicio de los tiempos en los que se transmitía energía hacia los usuarios, tanto residenciales como industriales, y cuya forma de contabilizar su consumo, era mediante contadores de energía analógicos, los mismos que aún se utilizan en países en vías de desarrollo [13]. Varios países están optando por relevar esta forma de contabilizar el consumo de suministro energético, y dinamizar el trabajo con la ayuda de sistemas de medición inteligentes; uno de estos sistemas es *AMR (Adaptive Multi-Rate)*, y debido a sus limitaciones en transmisión de información al igual que su almacenamiento de información es limitada, y dependiente de enlaces de última milla proporcionada por empresas de comunicación de los distintos países, que prestan sus servicios e instalaciones a las empresas de distribución de energía, para realizar la transmisión [14].

Actualmente ya no se están utilizando los sistemas de *AMR*, debido a que estos dispositivos limitan la capacidad de transmisión de información, al igual que el almacenamiento de información y cuya interoperabilidad solo se da con dispositivos de la misma marca comercial [14]. A pesar que este fue uno de los pioneros y primeros sustitutos de los medidores de energía analógicos; donde se llegaba a la lectura automática sin la necesidad de que una persona la realice de forma presencial y cuyos datos se los enviaban a las empresas de distribución de energía eléctrica. Estos también están siendo sustituidos por sistemas *AMI (“Advanced Metering Infrastructure”)* que en los últimos tiempos ha tenido un gran impacto en el desarrollo de la Medición Inteligente (“*Smart Metering*”) basados en la recolección de información o datos de los Medidores Inteligentes (“*Smart Meters*”).

Uno de los principales problemas radica en la gran rapidez con la cual se están desarrollando las tecnologías de transmisión de información, en donde basta con unos tres años de utilización de los diversos

dispositivos, estos pasen a ser obsoletos debido a los avances de la tecnología y desarrollo de la transmisión de la información, por lo que es de mucha importancia el saber el desarrollo de nuevas tecnologías, donde es necesario saber cuál es el talón de Aquiles en el caso de suceder un desastre [15].

Diferentes tecnologías inalámbricas se han incorporado a las casas o departamentos debido a la interoperabilidad, flexibilidad, rentabilidad, y las consiguientes mejoras en muchas aplicaciones en casas inteligentes. La proliferación de los bien conocidos estándares inalámbricos como *ZigBee*, *Z-Wave*, *Wi-Fi*, *Bluetooth*, *Insteon* y *EnOcean* pueden considerarse una ventaja desde un punto de vista tecnológico, pero un comercial inconveniente al mismo tiempo [14].

Una de las especificaciones inalámbricas más difundida es la *IEEE 802.15.4*, diseñada para bajo consumo de energía inalámbrica y redes de área con baja velocidad de datos de hasta 250 kb/s. La *IEEE 802.15.4* se puede utilizar como una base para protocolos de capa superior como la *ZigBee*, desarrollado por la *Alianza ZigBee* que incorpora enrutamiento predefinido y redes funcionales para la gestión de redes de fácil administración [14].

Al asumir la adopción de dispositivos inalámbricos *ZigBee* y el uso de la terminología correspondiente, la arquitectura básica de la *WSN* despliega para el hogar inteligente aplicaciones, se basa en el apoyo a la topología de la malla de red, y asociados a un coordinador de la red que gestiona la red y recoge los datos [14].

El coordinador es interconectado con una unidad de control como la puerta de entrada a casa, *Smart TV*, ordenador portátil, etc., para permitir el reenvío de datos, procesamiento, y la visualización. A partir de una cadena principal heterogénea tales funcionalidades deberían fácilmente integrarse añadiendo a la red un conjunto de dispositivos finales específicos en toda la casa y el establecimiento de los enlaces inalámbricos con los *routers* cercanos [16-17].

El *energy-roaming* nos permite controlar un área de cobertura móvil, que puede pasar de un lado hacia el otro en cuestión de segundos sin la necesidad de perder conectividad y garantizar la comunicación en el servicio, los mismos que se hallan presentes también en sistemas *Ad-Hoc* que operan sin la necesidad de una infraestructura fija existente [2].

Interoperabilidad: En la actualidad es necesaria la creación de dispositivos que permitan interactuar con diferentes dispositivos de diversas marcas o casa fabricantes, lo que lograría un mayor desarrollo de las *AMI* para medición inteligente, ya que actualmente se disponen de *AMI* que están bajo un código de propietario, que no me permite interactuar con *diversos AMI* de diversos fabricantes[2].

Escalabilidad en el proceso de transmisión de datos: la realización de estas actualizaciones, es necesaria obviamente la utilización de un sistema de control de energía que permita verificar si el sistema está o no sobrecargado, sin perder la propiedad deseable del sistema, permitiendo tener un excelente control en el proceso de transmisión de datos y asegurar la información transmitida de manera fiable, efectiva y veras [2].

Lo primero que opera *Smart Grid* es, eficiencia y confiabilidad.

Es necesario que en un sistema nuevo de medición inteligente, este sea de un costo bajo y que funcione con eficiencia cuyos datos de comunicación sean factibles, realizables y económicamente sustentables en el tiempo [4].

2.1 Red de área doméstica

Dentro de un red doméstica, las cargas eléctricas podrán ser interrumpibles (termostatos, refrigeradoras) e interrumpibles pero controlables (lavadoras), también pueden ser no controladas, no interrumpibles (iluminación) e interrumpibles no controlables (televisor, equipo de sonido, ordenador); pero en definitiva todas las cargas podrán ingresar al medidor inteligente y enviar la información de consumo a las empresas de distribución a esto se suma la generación distribuida de fuentes solares y eólica que son las más empleadas en los sistemas domésticos. Cada hogar podrá entonces tener un controlador de la demanda que advierta e informe el empleo en cada dispositivo, inclusive cargas como la de los autos eléctricos; a este concepto de lo denomina *Home Area Network-HAN* [2].

Todos los dispositivos inteligentes necesitan una forma para hablar con otros. En el hogar la comunicación probablemente tendrá lugar sobre una red de área doméstica (*HAN*) en el que cada aparato es un nodo y la red está conectada a un medidor de energía inteligente. Ver figura 2.

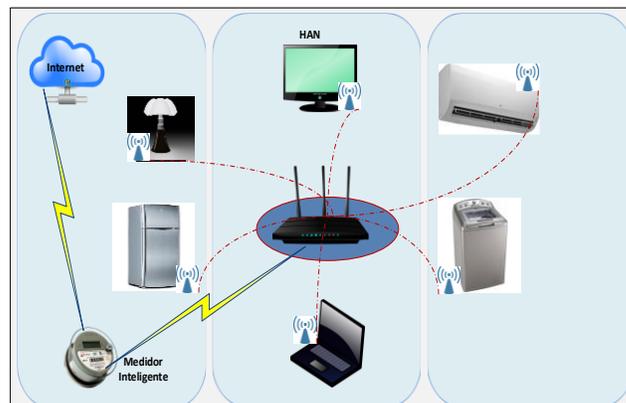


Figura 2. Comunicación de los dispositivos inteligentes a través de una red de área local.

2.2 Capacidad, cobertura e interferencia

La cobertura se halla en relación al número de usuarios, que acceden a un servicio dentro de un área determinada, que en este caso vendrá determinada por las características del Access-Point, dando cobertura variable ya sea de un cien por ciento o menor, por los diversos tipos de interferencia que se puede suscitar, especialmente debido al tipo de área geográfica que cubrimos, que es uno de los principales problemas que hallamos dentro de la medición inteligente [18]. Por esta razón no se puede garantizar que el cien por ciento de la capacidad de la señal sea transmitido hacia todos los usuarios.

El radio de cobertura puede ser fijo o variable, el mismo que se considerará fijo si trabajamos con la misma casa comercial y el mismo tipo de equipos de Access-Point, mientras que se considerará variable si trabajamos con diferentes marcas comerciales o equipos diferentes de Access-Point, donde para nuestro caso vamos a considerar que trabajamos con una misma marca y con los mismos equipos de transmisión de información [1], cuyo radio de cobertura estará desglosado en dos casos, para cuando nuestro radio de cobertura esté en el peor de los casos que será a una distancia de 15 km y en el mejor de los casos a una distancia de 25 km; con el objetivo de garantizar que los *AMI*, entreguen toda la información respectiva a cada uno de las respectivas bases de una forma eficiente[2].

Cuando el número de AP aumenta también lo hace la interferencia, disminuyendo la capacidad. Los canales inalámbricos a través de nodos intermedios para coordinar sus actividades de detección introducirán interferencia entre las infraestructuras, si están

desplegadas en zonas próximas, bajo este escenario se necesitaría la utilización de asignación de recursos y de control[6]. Se propone un algoritmo de despliegue de nodos, basado en la optimización de la cobertura y la energía de consumo, pero el movimiento de nodos está limitada por el medio.

La interferencia en entornos extremadamente ocupados se la puede abstraer de acuerdo al canal que se comunique, es decir, dos o más dispositivos deben hallarse operando a diferente canal de transmisión lo que otorga confiabilidad.

El monitoreo de una área amplia fiable con redes de sensores inalámbricos sigue siendo un problema. Simplemente despliega más nodos para cubrir áreas más amplias en general no es una solución viable, debido al despliegue y los costes de mantenimiento y el aumento de la interferencia de radio [19].

Una posible solución es el uso de un número reducido de los nodos con trayectorias controlable. El problema consiste en planear una red donde los AP muy cercanos entre si se interfieren unos con otros. Es decir, no se puede arbitrariamente colocar dos AP muy cercanos porque se interfieren el uno al otro. Los AP que están dentro de una distancia de interferencia no pueden encenderse simultáneamente. Este modelo es la base para otros modelos que buscan asignar canales.

3. Metodología

Supongamos una zona cuadrada, abierta y plana. En esta zona se van a ubicar AP de WLAN para dar conectividad usuarios que se encuentren dentro de un radio de cobertura. La capacidad de un AP es limitada y está dada por el número de usuarios simultáneos que puede atender. Los usuarios pueden ubicarse en cualquier posición dentro de la región (casa) y buscan conectarse a algún AP que se encuentre disponible y con capacidad para atenderlo.

Para el estudio de capacidad, cobertura e interferencia en un sistema de conexiones inalámbricas *Smart Home*, se modelará en un departamento de una planta donde tendremos dispositivos que se puedan conectar a una red inalámbrica y se colocarán los *Access-Point* y por medio de los *softwares* Matlab y *LPSolver* se realizará la optimización de equipos de *Access-Point* reduciendo el costo de la instalación y el costo de los equipos no utilizados. Se utilizarán restricciones dadas a continuación:

- Suponga un conjunto N de usuarios ubicados aleatoriamente en la región. Suponga así mismo M posibles localizaciones de AP en la región, una posible localización es un lugar donde se podría colocar un AP, pero no necesariamente se ubique uno.

- Se define que un usuario es cubierto, si se encuentra dentro de una distancia R de al menos un AP activo.

- Se define que un sitio candidato se considera un sitio activo, si en el sitio candidato se habilita un AP.

- Los AP tienen una cantidad de atender C usuarios simultáneos.

3.1 Análisis matemático

Para la mención del problema se considera un conjunto de N usuarios.

El costo de implementación de una radio base se considera uniforme con valor CBS. Para la ubicación de radio bases se tiene un conjunto de sitios candidatos S, los mismos que están predefinidos considerando las limitaciones geográficas de la zona de implementación de la red.

La conexión entre radio base se realiza considerando los siguientes parámetros:

$Y_{i,b} = 1$, si la radio base b se encuentra emplazada en el sitio candidato i; de otra manera es igual a 0.

$X_{i,j} = 1$, si existe un enlace entre la radio base i y la radio base j; de otra manera es igual a 0.

Donde:

Asumimos la minimización de costos por operación de la red.

$$\min C_{BS} \sum_{i \in S} Y_i^b + C_{BS} \sum_{i,j \in S} X_{i,j} \cdot d_{i,j} \quad (1)$$

Establecemos la existencia de enlaces activos

$$Y_i^b \sum_{j \in S} X_{i,j} \geq 0, \quad \forall i \in S; \forall b \in BS \quad (2)$$

Delimitamos el número de usuarios conectados a una radio base.

$$Y_i^b \sum_{u \in U} u \leq M, \quad \forall i \in S; \forall b \in BS \quad (3)$$

Localizamos la distancia máxima de un usuario a una radio base radio de la zona de cobertura.

$$d_{i,b} \leq z_b, \quad \forall i \in U; \forall b \in BS \quad (4)$$

Restringimos la distancia de un enlace para que no supere el valor de longitud máximo permitido.

$$d_{i,j} \leq A, \quad \forall i, j \in BS \quad (5)$$

Aplicamos una cantidad K de radio bases.

$$\sum_{b \in BS} b \geq \frac{N}{M} \quad (6)$$

Limitamos el valor porcentual de utilización de una ruta.

$$\sum_{l \in L} \frac{r_l \cdot X_{i,j}^l}{T} \leq \alpha \quad (7)$$

Revela la suma de los flujos de tráfico parciales.

$$\sum_{l \in L} r_l = r \quad (8)$$

Muestra un recorrido en el que puede usar el enlace entre dos estaciones base i, j si dicho enlace consta activo dentro de la topología.

$$X_{i,j}^l \leq X_{i,j} \quad (9)$$

La cobertura se halla en función de la probabilidad que tenemos al realizar la asignación de usuarios y puntos de acceso inalámbrico modificando el radio de cobertura del equipo.

La función objetivo va desde Z_1, Z_2, Z_3 hasta el número N de *Access-Point* que vayamos a colocar.

La restricción (este es un proceso de igualdad o una inecuación) está en función de la cobertura de cada usuario, en donde la probabilidad de cobertura está dada dentro de los siguientes parámetros.

Cuando el resultado sea:

1 es cuando la distancia del nodo del usuario es menor al radio.

0 es cuando la distancia del nodo del usuario es mayor al radio.

El número de ecuaciones de restricción es solamente una para todos los usuarios.

En binario se imprime el número de usuarios conectados, y con ello sabemos el porcentaje de cobertura.

La optimización se da cuando al menos se optimiza un *Access-Point* para que el algoritmo sea eficiente.

Función objetivo:

- Minimizar el número de *Access-Point*.
- Minimizar el número de usuarios.

La restricción está en función de la cobertura de cada usuario, a la cual a cada usuario damos la misma restricción de igualdad.

A continuación, se ingresa una matriz de cobertura de todos los usuarios, donde cada usuario tendrá un número determinado de *Access-Point* al que puede conectarse.

Donde:

1 es cuando la distancia del nodo del usuario es menor al radio.

0 es cuando la distancia del nodo del usuario es mayor al radio.

Algoritmo de Optimización para la ubicación de Access-Point

Paso 1: Asignación de la posición de cada dispositivo de medida

$$ax_i, by_i$$

Paso 2: Asignación de la posición de los puntos candidatos para los Access-Point

$$Centroides = (xs_i, ys_i)$$

Paso 3: Ingresar el radio de cobertura de los Access-Point

$$Radio = R$$

Paso 4: Ingresar la capacidad del Access-Point

$$Capacidad = Cap$$

Paso 5: Ingresar porcentaje de dispositivos de medida a cubrir

$$Porcentaje = Porc$$

Paso 6: Ingresar el número de canales disponibles

Numero de Canales = K

Paso 7: Distancias Euclidianas

For $i = 1$ hasta el número de los puntos candidatos para los Access-Point

For $j = 1$ hasta número de dispositivos de medida

$$dist_{ij} = \text{Distacia Euclidiana Centroides} = (xs_i, ys_i)$$

End

End

Paso 8: Lectura del archivo extensión .csv

Paso 9: Resultados gráficos de optimización de los Access-Point formatos png y eps.

4. Análisis de resultados

Se presenta los resultados obtenidos tras correr el algoritmo en MatLab. Se analiza cada caso; el primero con restricción de cobertura el segundo con restricciones de cobertura y capacidad y el tercero con restricciones de cobertura, capacidad e interferencia. Para cada uno de los casos se presentan dos gráficas, la primera presenta la ubicación de un numero de AP que consideramos para dar cobertura a cada uno de los puntos dentro de una casa donde existiría carga a ser medida y la segunda muestra la optimización dándonos el punto de ubicación final reduciendo así el número de AP que serán los encargados de dar cobertura a la red de sensores *IEEE 802.15.4g* y estos a su vez transmitirán los datos que serán recogidos por el medidor inteligente.

4.1 Cobertura

Se procede a realizar el problema con la conformación y selección de criterios propuestos. Supongamos un conjunto N de usuarios ubicados en la región, así mismo M posibles localizaciones de AP en la figura 3. Se define que un usuario es cubierto, si se encuentra dentro de una distancia R del al menos un AP. Encontrar el mínimo número de sitios activos tales que cubran al menos el porcentaje de los usuarios.

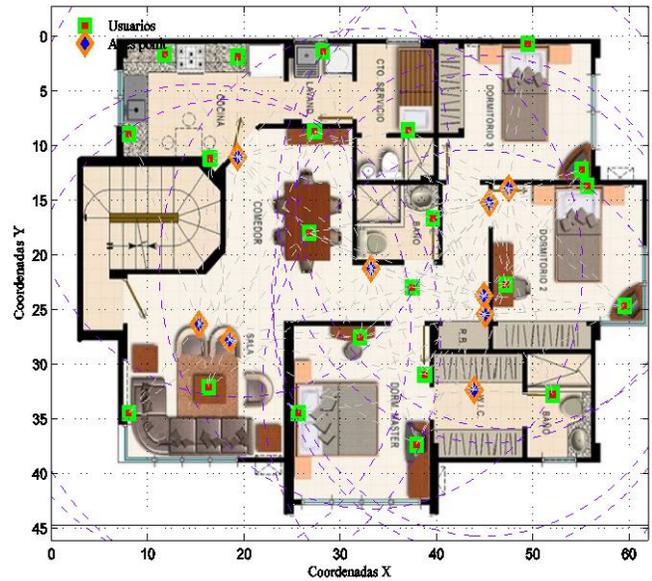


Figura 3. Arquitectura no óptima.

La figura 3 presenta la cobertura de los *Access- Point* sin optimización para un total de 22 usuarios (representan los posibles puntos de uso), el radio es de 15 mts por cada AP y 9 puntos candidatos para la ubicación de los mismos.



Figura 4. Arquitectura óptima.

La figura 4 es el resultado de la ubicación óptima para los AP que de 9 puntos candidatos posteriores a la optimización se reducen a 2.

4.2 Cobertura y capacidad

Para la resolución de este ejercicio se plantea el problema considerando no solo la cobertura sino la capacidad de la red, se logra cubrir al menos un 95% de un conjunto arbitrario de usuarios, ubicando AP arbitrariamente. Cada AP tiene un radio determinado y una capacidad limitada en cuanto al número de usuarios.

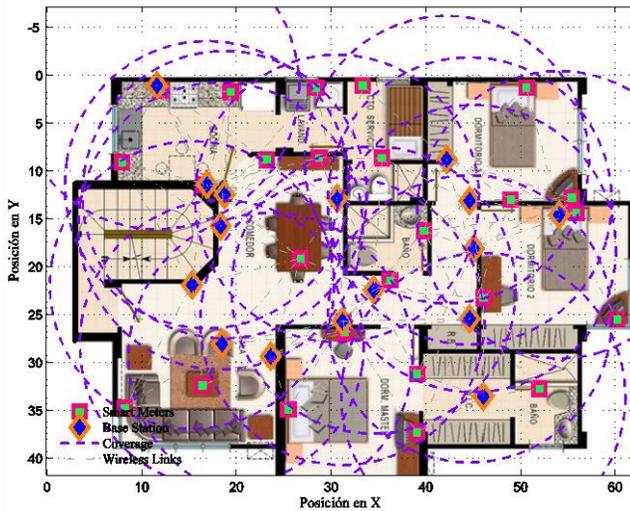


Figura 5. Arquitectura no óptima.

La figura 5 presenta el grafico de la cobertura de los *Access-Point* sin optimización con restricciones de capacidad y cobertura, se utiliza como herramienta fundamental un algoritmo en *Matlab*. El radio es de 10 mts por cada AP, la capacidad máxima es 5, se logra cubrir al menos el 95% del conjunto, existe un total de 22 usuarios (representan los posibles puntos para los sensores) y 14 puntos candidatos para la ubicación de los AP.

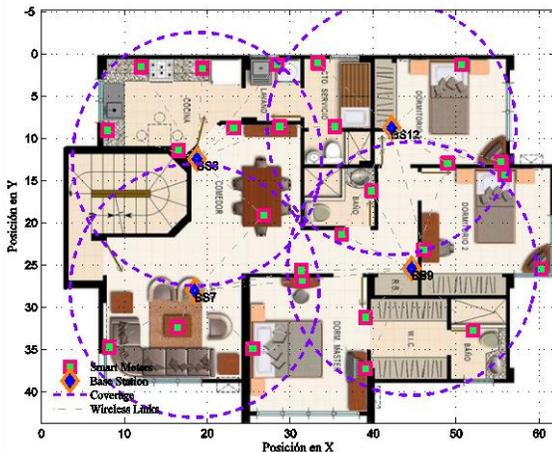


Figura 6. Arquitectura óptima.

La figura 6 es el resultado de la ubicación óptima para los AP teniendo en cuenta la restricción de capacidad máxima 5, por tanto, los 14 puntos candidatos posteriores a la optimización se reduce a 2.

4.3 Cobertura, capacidad e interferencia

Para la resolución de este ejercicio se plantea el problema considerando restricciones de capacidad, cobertura e interferencia. Supongamos una zona cuadrada, abierta y plana. En esta zona se van a ubicar AP de WLAN para dar conectividad usuarios que se encuentre dentro de un radio de cobertura. La capacidad de un AP es limitada y está dada por el número de usuarios simultáneos que puede atender. Los AP operan en un mismo canal, por lo que no puede haber dos AP a menos de una distancia de interferencia, pues producirían interferencia uno con otro. Los usuarios pueden ubicarse en cualquier posición dentro de la región y buscan conectarse a algún AP que se encuentre disponible y con capacidad para atenderlo.

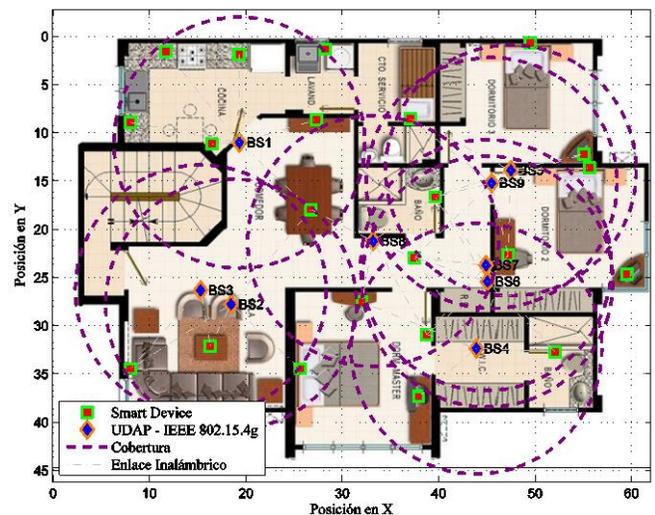


Figura 7. Arquitectura no óptima.

Teniendo en cuenta la nueva restricción de interferencia. La figura 7 presenta el grafico de la cobertura de los *Access-Point* sin optimización. Para el análisis de este ejercicio no se ha tomado en cuenta el grosor de las paredes. El radio es de 13 mts por cada AP, la capacidad máxima es 6, se logra cubrir al menos el 85% del conjunto, el número de canales disponibles es 3, existe un total de 22 usuarios (representan los posibles puntos para los sensores) y 9 puntos candidatos para la ubicaciones de los AP.



Figura 8. Arquitectura óptima.

La Figura 8 es el resultado de la ubicación óptima para los AP teniendo en cuenta también la restricción de interferencia que limita el número de canales disponibles para cada AP, por tanto, los 9 puntos candidatos posteriores a la optimización se reducen a 4.

5. Conclusiones

En actualidad se realizan estudios avanzados para desarrollar nuevas tecnologías y *softwares* para la transmisión de datos. El optimizar los recursos de ubicación de los dispositivos representa costos, aquí radica la importancia de implementar un algoritmo de optimización debido que los equipos de comunicación independiente de su uso y la marca los costos pueden ser muy elevados.

El número de puntos candidatos para la ubicación de los *Access-Point* está directamente relacionado al número de ecuaciones que crea el *LPSolver*, por tanto, cuando al problema se añade restricciones de capacidad e interferencia, se utilizará más puntos candidatos. Si se toma en cuenta únicamente la cobertura el parámetro variable es el radio como resultado el número de *Access-Point* para cubrir el área total es 2, sin embargo, cuando se añade restricciones de capacidad e interferencia el número de *Access-Point* para cubrir el área total es 4, se concluye entonces que cuando existen limitaciones el número de dispositivos a utilizarse aumenta.

El tener una red inalámbrica *Smart Grid* y utilizar cada uno de sus componentes a su máxima capacidad nos permite tener una optimización y realizar un completo control de los dispositivos o sensores que se desea administrar. Por esta razón en este trabajo se propone que la solución más fiable puede ser una red de malla que incorpora comunicaciones de máquina a máquina, permitiendo que los dispositivos se comuniquen automáticamente con la mínima intervención humana. Estos dispositivos podrían reportar periódicamente información como la lectura de energía.

6. Referencias

- [1] H. Wang, Y. Qian, and H. Sharif, "Multimedia communications over cognitive radio networks for smart grid applications," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 20, no. August, pp. 125–132, 2013.
- [2] E. Inga and J. Rodriguez, "Estrategias de Negocio Para Medición Inteligente Acoplando Energías Renovables," *Prim. Congr. Int. y Expo Científica*, vol. 1, pp. 281–291, 2013.
- [3] A. Boustani, M. Jadliwala, H. M. Kwon, and N. Alamatsaz, "Optimal Resource Allocation in Cognitive Smart Grid Networks," pp. 499–506, 2015.
- [4] M. Collotta and G. Pau, "A Novel Energy Management Approach for Smart Homes using Bluetooth Low Energy," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 12, pp. 1–1, 2015.
- [5] S. E. Nezhad, H. J. Kamali, and M. E. Moghaddam, "Solving K-Coverage Problem in Wireless Sensor Networks Using Improved Harmony Search," *2010 Int. Conf. Broadband, Wirel. Comput. Commun. Appl.*, pp. 49–55, 2010.
- [6] D.-M. Han and J.-H. Lim, "Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and ZigBee," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 1403–1410, 2010.
- [7] M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah, "Wireless Sensor Networks for Cost-Efficient Residential Energy Management in the Smart Grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 314–325, 2011.
- [8] R. Amin and J. Martin, "Smart Grid Communication using Next Generation Heterogeneous Wireless Networks," *Smart Grid Commun. (SmartGridComm), 2012 IEEE Third Int. Conf.*, pp. 229–234, 2012.
- [9] C. S. Sum, F. Kojima, and H. Harada, "Coexistence of homogeneous and heterogeneous systems for IEEE 802.15.4g smart utility networks," *2011 IEEE Int. Symp. Dyn. Spectr. Access Networks, DySPAN 2011*, no. d, pp. 510–520, 2011.
- [10] R. Missaoui, H. Joumaa, S. Ploix, and S. Bacha, "Managing energy Smart Homes according to energy prices: Analysis of a Building Energy Management System," *Energy Build.*, vol. 71, pp. 155–167, 2014.
- [11] Y. Liu, "Wireless Sensor Network Applications in Smart Grid: Recent Trends and Challenges," vol. 2012, pp. 2–7, 2012.
- [12] D. F. R. Hincapié and S. Céspedes, "Evaluation of mesh-under and route-over routing strategies in AMI systems," *Commun. Conf. (COLCOM), 2012 IEEE Colomb.*, pp. 1–6, 2012.

- [13] O. Asad, M. Erol-Kantarci, and H. Moutah, "Sensor network web services for Demand-Side Energy Management applications in the smart grid," *Consum. Commun. Netw. Conf. (CCNC)*, 2011 *IEEE*, pp. 1176–1180, 2011.
- [14] F. Viani, F. Robol, A. Polo, P. Rocca, G. Oliveri, and A. Massa, "Wireless architectures for heterogeneous sensing in smart home applications: Concepts and real implementation," *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 11, pp. 2381–2396, 2013.
- [15] R. Hincapié, "Optimal Planning for Cellular Networks for Smart Metering Infrastructure in Rural and Remote Areas * Óptima Planeación de Redes Celulares para la Infraestructura de Medición Inteligente en Zonas Rurales y Remotas," vol. 11, no. 2, pp. 49–58, 2015.
- [16] G. Koutitas and L. Tassiulas, "A delay based optimization scheme for peak load reduction in the smart grid," *Proc. 3rd Int. Conf. Futur. Energy Syst. Where Energy, Comput. Commun. Meet - e-Energy '12*, pp. 1–4, 2012.
- [17] I. Workshop and S. Processing, "A LARGE SCALE AND LOW COST SOLUTION FOR REAL-TIME INDOOR Universit ´ e de technologie de Troyes Institut Charles Delaunay ICD , UMR STMR 6279 BP 2060 - 10010 TROYES Cedex email : abdelkader.miraoui@utt.fr," no. 2, pp. 392–395, 2011.
- [18] A. R. Devidas, T. S. Subeesh, and M. V. Ramesh, "Design and implementation of user interactive wireless smart home energy management system," *2013 Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Informatics*, pp. 626–631, 2013.
- [19] S. K. Das, D. J. Cook, A. Bhattacharya, E. O. Heierman, and T. Y. Lin, "The role of prediction algorithms in the MavHome smart home architecture," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 6, pp. 77–84, 2002.
- [20] E. Inga, G. Arevalo, and R. Hincapié, "Optimal deployment of cellular networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid," *Commun. Comput. (COLCOM)*, *2014 IEEE Colomb. Conf.*, pp. 1–6, 2014.

Clase de red de Petri para usos de recursos binarios ordenados

Binary Ordered Resources Petri Net Class

Carlos A. Rovetto¹, Tomás J. Concepción², Elia. E. Cano³
^{1,2,3}Depto. de Ciencias de la Computación, Universidad Tecnológica de Panamá
¹carlos.rovetto@utp.ac.pa, ²tomas.concepcion1@utp.ac.pa, ³elia.cano@utp.ac.pa

Resumen—La prevención/evitación de los bloqueos mutuos es un dominio de investigación activo que exige aplicar diversas políticas de control para hacer frente a este problema. En este artículo presentamos una nueva subclase de Red de Petri especializada llamada Clase de red de Petri para usos de recursos binarios ordenados (BORPN) y sus principales propiedades estructurales. En esencia esta nueva clase está construida a partir de diversas máquinas de estados que comparten recursos unitarios en forma compleja, lo que permite el modelado de bifurcaciones y procesos de unión. La estructura reducida de esta nueva clase de red de Petri así como su marcado de los recursos proporciona ventajas que permiten el análisis de todo el comportamiento del sistema, siendo una tarea prohibitiva para grandes sistemas como los algoritmos de encaminamiento.

Palabras claves— Bloqueo mutuo, clase BORPN, redes de Petri, sifones, Sistemas de Asignación de Recursos.

Abstract—*Prevention/avoidance of deadlocks is an active research domain that requires to implement diverse control policies to address this problem. In this paper we present a new specialized Petri Net subclass called Binary ordered resources petri net (BORPN) and its main structural properties. Essentially it is an ordinary class constructed from various state machines that share unitary resources in a complex form, which allows branching and joining processes. Its reduced structure of this new class gives advantages that allow analysis of the entire system behavior, being a prohibitive task for large systems because of the complexity and routing algorithms.*

Keywords— *Deadlock, BORPN class, Petri nets, siphons, Resource Allocation Systems.*

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 27 de enero de 2016

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

1. Introducción

El concepto de vivacidad está estrechamente relacionado con la ausencia de bloqueos mutuos en los sistemas. Un bloqueo mutuo se produce si un estado del sistema se vuelve infinitamente inalcanzable por una solicitud de recursos sin respuesta. La propiedad de vivacidad establece que el sistema debe alcanzar todos los estados para los que fue diseñado, por tal motivo, esta propiedad sirve para caracterizar la ausencia de bloqueos mutuos. Debido a esta razón, siempre es deseable la presencia de esta propiedad en los sistemas concurrentes que comparten recursos en forma simultánea, porque permite alcanzar todos los estados del sistema. Desde el punto de vista de los sistemas de asignación de recursos, el objetivo es garantizar que se alcanzarán todos los estados deseados utilizando los recursos solicitados por un tiempo

determinado. La perspectiva de Sistemas de Asignación de Recursos (RAS) será utilizada para modelar los sistemas a través de las Redes de Petri, por lo tanto, los recursos se utilizan en forma conservadora, es decir que no se crean ni se destruyen. Como se sabe, una red de Petri es una técnica formal, gráfica y ejecutable para la especificación y análisis de sistemas dinámicos de eventos discretos concurrentes. En este trabajo, garantizaremos la ausencia de bloqueos del sistema a través de la búsqueda de la propiedad de vivacidad que se obtiene del análisis del modelo de la Red de Petri del sistema bajo estudio. Es conocido que los bloqueos mutuos se producen con más frecuencia en los sistemas con concurrencia, que son mejor descritos por las Redes de Petri. Además, las posibilidades de modelado de las redes de Petri no está limitado por la tecnología debido a que es un modelo matemático con una representación

gráfica utilizando un grafo bipartito. Normalmente, la manera de sintetizar y analizar sistemas concurrentes utilizando Redes de Petri es a través de las subclases con fortalezas para abordar problemas específicos. Por lo tanto, vamos a definir una nueva subclase de las redes de Petri llamada Clase de Red de Petri para Usos de Recursos Binarios Ordenados (BORPN) que se apoya en clases previamente existentes, las cuales han sido utilizadas para abordar problemas similares como la S^4PR [1] [2] y las clases de Redes de Petri ES^3PR [3].

Es bien conocido que una estructura reducida nos permite mejorar los algoritmos para analizar el modelo de Red de Petri, por lo tanto conciliar las habilidades que reducen el modelo de Red de Petri, mientras se evitan extensos cálculos es un deseo siempre presente en la literatura. Una estrategia similar se menciona en los enfoques [4] [5] en donde se utilizaban cálculos booleanos para evitar operaciones complejas. Intuitivamente, los Diagramas de Decisiones Binarias Ordinarias (OBDD) se han utilizado como estructuras de datos reducidas que pueden codificar compactamente muchas funciones en dominios estructurados discretos como [6] [7]. La clase BORPN es una clase especializada con una estructura reducida que enfrenta el problema de bloqueo mutuo en muchos sistemas distribuidos, como por ejemplo, en los algoritmos de encaminamiento de tipo wormhole o en los vehículos guiados automáticamente. Su estructura refuerza los algoritmos durante el proceso de análisis porque evita el gasto de memoria en grandes operaciones de cálculo para detectar objetos estructurales como sifones.

Como muestra la muy conocida propiedad de Commoner, algunos objetos estructurales como los sifones están estrechamente relacionados con las propiedades de comportamiento básicas de las Redes de Petri, como la vivacidad y la ausencia de bloqueos activos, en donde una parte del sistema funciona pero otra permanece bloqueada. El análisis estructural del modelo de la Red de Petri nos permite demostrar algunas propiedades a través de los sifones para asegurar la vivacidad del modelo, sin embargo este cálculo utiliza mucha memoria e incluso en algunos casos es imposible realizarlo debido al problema de la explosión de estados. Varios métodos permiten reducir el número exponencial de cálculos como ecuaciones lineales o desigualdades, simetrías, diseño modular, etc. Un nuevo enfoque se presenta en [8] que trabaja con objetos de nivel más alto, evitando el desperdicio de memoria en los pasos intermedios. El método está basado en la teoría de grafos y en la manipulación de los

subgrafos fuertemente conectados máximos que existen en el grafo [9]. Este artículo está organizado de la siguiente forma. Sección 2 incluye la definición de clase BORPN y sus propiedades básicas. La sección 3 se dedica al análisis de la propiedad de vivacidad en esta clase de red de Petri. También se presenta en esta sección un ejemplo de encaminamiento básico modelado con esta clase de red. La sección 4 presenta las conclusiones y finalmente el apéndice se incluye definiciones básicas y notaciones de las Redes de Petri lugar transición.

2. Definición de la clase y propiedades

2.1 Clase red de Petri para usos de recursos binarios ordenados

Durante esta sección vamos a introducir la clase de Red de Petri BORPN y sus principales propiedades. Esta clase es una subclase de las clases S^4PR [1] [2] y los ES^3PR [3] de Redes de Petri, por lo tanto, todos los resultados teóricos existentes para estas redes se pueden aplicar para esta subclase, sin embargo el razonamiento contrario no es posible. La clase BORPN tiene una valiosa información estructural dada por su estructura reducida que será utilizada para el análisis de las propiedades de buen comportamiento del modelo como la vivacidad. Estas características como su estructura reducida provienen de la restricción impuesta a las transiciones de la clase BORPN, porque solo realiza operaciones binarias. Cada transición podría tomar o liberar recursos en forma unitaria, de forma muy similar al comportamiento de un algoritmo de encaminamiento como los de tipo *wormhole* que solicitan y liberan los canales como recursos para transportar los mensajes en forma de cadenas de bits o flits. La clase BORPN se define de la siguiente manera:

Definición 1. (La clase de red de Petri de recursos binarios ordenados). Digamos que $I_N = \{1, 2, \dots, m\}$ es un conjunto finito de índices. Una Red de Petri de Recursos Binarios Ordenados es una red de Petri fuertemente conectada, libre de ciclos propios $\mathcal{N} = \langle P, T, C \rangle$ donde:

- 1) $P = P_0 \cup P_S \cup P_R$ es una partición tal que:
 - a) $P_S = \bigcup_{i \in I_N} P_{S_i}$, $P_{S_i} \neq \emptyset$ y $P_{S_i} \cap P_{S_j} = \emptyset$, para toda $i \neq j$.
 - b) $P_0 = \bigcup_{i \in I_N} \{p_{0_i}\}$.
 - c) $P_R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, $n > 0$.
- 2) $T = T_a \cup T_r$ es una partición tal que:

- a) $T_a = \bigcup_{i \in I_{\mathcal{N}}} T_{ai}$, $T_{ai} \neq \emptyset$, $T_a \in P_R^\bullet$, para cada $i, j \in I_{\mathcal{N}}$ $T_{ai} \cap T_{aj} = \emptyset$, para toda $i \neq j$
- b) $T_r = \bigcup_{i \in I_{\mathcal{N}}} T_{ri}$, $T_{ri} \neq \emptyset$, $T_r \in \bullet P_R$, para cada $i, j \in I_{\mathcal{N}}$ $T_{ri} \cap T_{rj} = \emptyset$, para toda $i \neq j$
- 3) Para todo recurso r , $r \in I_{\mathcal{N}}$, la subred \mathcal{N}_i generada por $P_{S_i} \cup \{p_{0_i}\} \cup T_{ai} \cup T_{ri}$ es una máquina de estado fuertemente conectada, tal que cada ciclo contiene p_{0_i} e induce un T-Semiflujo mínimo.
- 4) Para cada $r \in P_R$ existe un P-Semiflujo mínimo, $\mathbf{Y}_r \in \{0, 1\}^{|P|}$, tal que $\{r\} = \|\mathbf{y}_r\| \cap P_R$, $\mathbf{y}_r[r] = 1$, $P_0 \cap \|\mathbf{y}_r\| = \emptyset$, $P_S \cap \|\mathbf{y}_r\| \neq \emptyset$.
- 5) $P_S = \bigcup_{r \in P_R} (\|\mathbf{y}_r\| \setminus \{r\})$.

Todo el modelo de red de Petri BORPN está compuesto por diversas redes fuertemente conectadas denotadas por N_i donde $i \in \mathbb{N}^+$. Una red de Petri libre de bucles existe sii $\forall t \in T | \bullet t \cap t^\bullet = \emptyset$. En la Figura 2 cada máquina de estado (SM) corresponde a una subred que juntas forman una sola red de Petri de la clase BORPN. Debido a que los problemas de bloqueo mutuo están relacionados a estados inalcanzables producidos por diversos procesos que de forma simultánea retienen y solicitan recursos generando un bucle que no permite ninguna evolución de los procesos. Como se muestra en la definición 1, del Apartado 1, los lugares P son particionados en tres grupos representados por: a) los lugares proceso P_S , b) los lugares de reposo P_{0_i} representando los mensajes en espera, c) y los recursos P_R . Los lugares recursos representan la disponibilidad de los recursos, que debido a perspectiva RAS estos no pueden ser creados o destruidos por los procesos. La estructura de la clase BORPN impone que cada ciclo contiene los lugares reposos P_{0_i} . Si un proceso comienza adquiere una marca del lugar reposo y al terminar el proceso la marca del lugar reposo debe retornar. Es decir, durante la evolución del proceso diversos recursos pueden ser utilizados, sin embargo deben ser liberados cuando el proceso finalice. La propiedad de vivacidad se busca para garantizar la terminación de los procesos y así tener el sistema libre de bloqueos mutuos. Cada proceso requiere el uso de al menos un recurso, sin embargo deben ser adquiridos o liberados en forma unitaria. Por el motivo anterior el componente \mathbf{Y}_r es un vector booleano debido al comportamiento peculiar de esta red.

Las transiciones en una BORPN tienen un comportamiento particular siguiendo nuestro enfoque de los recursos RAS. Nosotros consideramos que el comportamiento del proceso se asemeja a una tubería, donde puede ser particionada en unidades de proceso. La primera unidad de proceso en adquirir los recursos es la última unidad en liberarlos. Esta aproximación restringe el comportamiento de las transiciones y nos permite modelar con más fidelidad sistemas particulares a diferencia de aproximaciones tradicionales. Por esta razón, somos capaces de modelar procesos que representa el transporte de objetos (mensajes, items, etc) a través de redes o centros de distribución en un almacén. La Definición 1 del Apartado 2 está relacionada con las transiciones que están particionadas en dos conjuntos disjuntos. Transiciones T_a y T_r que significan adquirir y liberar respectivamente, por consiguiente $\forall \{t_i, t_j\} \in T$ tanto que $|\bullet t_i \cap P_R| = 1$ ó $|t_j^\bullet \cap P_R| = 1$ donde $i \neq j$. Sin embargo, esta restricción no impide las bifurcaciones, siendo una característica útil para representar sistemas complejos en donde se presentan problemas de bloqueos mutuos. En [10] donde se prueba que una máquina de estado fuertemente conectada $|\bullet t| = |t^\bullet| = 1$ es viva, por lo que induce una propiedad invariante en la conservación de las marcas en los lugares. Para una BORPN esta propiedad se establece en la definición 1, del apartado 3, donde para todos los $i \in I_{\mathcal{N}}$, la subred \mathcal{N}_i generada por $\mathcal{N}_i = \langle P_{0_i} \cup P_{S_i}, T_{ai} \cup T_{ri}, C_i \rangle$ donde $i \in \mathbb{N}^+$ es una máquina de estado fuertemente conectada, tal que cada ciclo contiene un lugar p_{0_i} . Cada ciclo que contiene el lugar reposo cierra un circuito que induce un T-Semiflujo en ese camino. Finalmente en la Definición 1, de los Apartados 4 y 5 están relacionados con las propiedades estructurales invariantes de los recursos y lugares reposo respectivamente. De esta forma, para cualquier $r \in P_R$ existe un mínimo P-Semiflujo donde $\mathbf{Y}_r \in \{0, 1\}^{|P|}$. Los lugares de proceso unidos con el recurso r son conocidos como lugares portadores \mathcal{H} . Estos lugares cargan la disponibilidad de los recursos mientras representan un estado de proceso, como lo muestra la Definición 2.

Definición 2. Consideremos que \mathcal{N} sea una BORPN y P_R . El conjunto de lugares de recursos. El conjunto de lugares portadores \mathcal{H} de r es el soporte del P-Semiflujo mínimo sin el recurso $\mathcal{H}_r = \|\mathbf{Y}_r\| \setminus \{r\}$ donde $r \in P_R$.

Una BORPN es una máquina de estado fuertemente conectada con recursos, por lo tanto todas sus transiciones tienen un único lugar de proceso entrada/salida y tendrían un único lugar de recurso entrada/salida. De esta manera, las transiciones podrían ser caracterizadas como habilitadas o deshabilitadas, a través del marcado del lugar de recurso como se muestra en la Figura 1 y es formalizado en las definiciones 3 y 4.

Definición 3. Consideremos que \mathcal{N} sea una BORPN, siendo P_R el conjunto de lugares de recursos y P_S el conjunto de lugares procesos. Una transición $t \in T$ está habilitada en el marcado o (deshabilitada en el marcado) resumido **mpe** o (**mpe**) sii $\forall p \in \bullet t \cap P_S$ el marcado M de p como $M(p) \geq PRE(p, t)$ o $(M(p) < PRE(p, t))$.

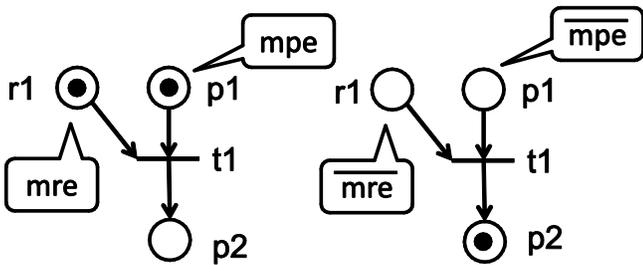


Figura 1. Marcado de recursos y procesos habilitado y deshabilitado.

Definición 4. Consideremos que \mathcal{N} sea una BORPN, siendo P_R el conjunto de lugares de recursos y P_S el conjunto de lugares procesos. Una transición $t \in T$ está habilitada en el marcado o (deshabilitada en el marcado) resumido **mre** o (**mre**) sii $\forall p \in \bullet t \cap P_S$ el marcado M de p como $M(r) \geq PRE(r, t)$ o $(M(r) < PRE(r, t))$.

Para transiciones que liberan recursos T_r es suficiente el marcado **mpe** para que sean disparadas, sin embargo para el conjunto que adquieren recursos T_a deben estar **mre** y **mpe** para poder ser disparadas. La transición t_1 de la parte izquierda de la figura 1 está habilitada en el marcado de proceso y habilitado en el marcado de recursos, contrario a la transición de la parte derecha que está deshabilitada en el marcado de proceso y deshabilitada en el marcado del recurso. Un camino es un T-Semiflujo de \mathcal{N} como X , donde por cada $\|X\| = 2$ no satisface una de las cuatro condiciones necesarias

y suficientes para la existencia de un bloqueo mutuo en [11]. Este tipo de ruta no tiene la condición Retención y Espera porque sólo solicita un recurso para finalizar el proceso completo. Por lo tanto, cada lugar p_i que pertenece a este tipo de T-Semiflujo es como sigue: $\forall p \in P_S \cap \mathcal{H}_r | \bullet p \cap r \bullet \neq \emptyset \wedge p \bullet \cap \bullet r \neq \emptyset$ donde $r \in P_R$. Debido a la estructura de la clase BORPN, algunos lugares nunca se encontrarán en una situación de bloqueo mutuo. A estos lugares se les denomina lugares-sin-bloqueo-mutuo.

Definición 5. Consideremos que \mathcal{N} sea una BORPN, siendo P_R el conjunto de lugares de recursos y P_S el conjunto de lugares procesos. Un lugar $p_i \in P_S$ es llamado lugares-sin-bloqueo-mutuo sii $p_i \bullet \cap \bullet P_R \neq \emptyset$.

Los lugares que satisfacen la definición 5 serán disparados cuando tengan el marcado mpe, por lo que nunca pertenecen a un estado de bloqueo mutuo, sin embargo pueden formar parte estructural de un sifón.

2.2 Clase BORPN

La nueva clase es definida para enfrentar problemas de bloqueo mutuo en sistemas concurrentes siguiendo nuestro enfoque RAS de los procesos. La BORPN es una clase ordinaria de red de Petri donde el P-Semiflujo de un recurso es un vector binario, por lo que existe un camino dirigido entre las transiciones que toma el recurso y las transiciones que lo liberan.

Definición 6. (Un camino dirigido). Un camino dirigido es una secuencia de lugares y transiciones $p_1 t_1, p_2 t_2, \dots, p_k t_k$ tal que $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ desde p_1 hasta p_k donde $t_i \in p_i \bullet \cap P_S$ y $t_i \in \bullet P_{i+1} \cap P_S$, para $1 \leq i \leq k$ y $\{i, k\} \in \mathbb{N}^+$.

Cuando este camino dirigido es relacionado con una clase BORPN es conocido como la zona de un recurso como muestra la definición 7. Esta característica es muy importante para evitar análisis estructural extensivo del modelo de red de Petri.

Definición 7. (Zona de un recurso). Consideremos que $\mathcal{N}_i = \langle P_i, T_i, C_i \rangle$, $i \in \mathbb{N}^{+|\mathcal{N}|}$ sea una BORPN y P_R el conjunto de recursos. La zona de un recurso es el conjunto de lugares portadores de $r \in P_R$ que intercepta la red \mathcal{N}_i como $Z_{ij}^r = \mathcal{H}_r \cap \mathcal{N}_i$, donde $i \in \mathbb{N}^{+|\mathcal{N}|}$ y $j \in \mathbb{N}^{+|P|}$.

El subíndice i representa la clase BORPN y si existe más de una zona el subíndice j se incrementará. Cuando el índice j es omitido, asumimos solo una zona para este recurso. En procesos lineales existe solo un camino dirigido entre la captura y liberación del recurso, sin embargo para procesos no-lineales existiría más de una captura o liberación del recurso. El corolario 1 declara la estructura existente para una zona en procesos lineales.

Corolario 1. (Zona de un recurso en procesos lineales). Consideremos que \mathcal{N} sea una BORPN con solo procesos lineales, donde P_R es el conjunto de lugares de recurso. Consideremos que $Z_{i,j}^r = \{p_1 \dots p_k\}$, tal que $k \in \mathbb{N}^{+|P|}$ la zona de un recurso r en la red \mathcal{N}_i para $j = 1$. El lugar $p_x \in \|\mathbf{Y}_r\|, \forall x = 1 \dots k$, donde $(p_x^\bullet)^\bullet \cap \|\mathbf{Y}_r\| = P_{x+1}$. Por lo que $\nexists s$ tal que $p_1 \in Z_{i,1}^s$ y $p_k \in Z_{i,2}^s$.

En una máquina de estado fuertemente conectada podrían existir procesos no-lineales, por lo que en esta red la zona de un recurso debe ser generalizada para considerar diferentes adquisiciones y liberaciones de los recursos. Debido al enfoque RAS del proceso los lugares de la primera parte del proceso son del conjunto S_A donde A significa adquiriendo. Los lugares que se mantienen en la última parte del proceso pertenecen al conjunto S_R , en donde R significa liberando. El corolario 2 describe la estructura para una zona en procesos no-lineales.

Corolario 2. (Zona de un recurso en procesos no lineales). Consideremos que \mathcal{N} sea una BORPN con procesos no lineales, donde P_R es el conjunto de lugares de recurso y $\{r,s\} \in P_R$. Consideremos $Z_{i,j}^r = (S_A \cup \setminus S_R)$, donde $\bullet S_A \subseteq r^\bullet, S_R^\bullet \subseteq \bullet r$. De esta manera, $\forall p_i \in S_A, \exists p_j \in S_R$ tal que $(p_i^\bullet)^\bullet \cap \|\mathbf{Y}_r\| = p_j, \forall i \neq j$. Por lo que, $\nexists p_x \in Z_{i,1}^s \cap S_A$ y $\nexists p_k \in Z_{i,2}^s \cap S_R, \forall x \neq k$.

La zonificación de los recursos produciría una superposición sobre las zonas de los recursos. Cuando exista una superposición entre diferentes zonas de recursos se denominará como equipos de recursos. El concepto del equipo viene del punto de vista donde un proceso adquiere/libera diversos recursos en orden estricto. Todos ellos están trabajando juntos durante el progreso del proceso como un equipo. Por otra parte, los equipos son una caracterización de este orden y serán

usados para describir la nueva clase BORPN. La definición 8 resume este concepto de equipo en una N_i .

Definición 8. Consideremos que \mathcal{N} sea una BORPN, siendo P_R el conjunto de recurso. Un equipo de recursos es un conjunto de lugares donde $\forall \{r_i, r_j\} \in P_R$, satisfaciendo que 1) $\exists P_X \subseteq \|\mathbf{Y}_{r_i}\| \cap \|\mathbf{Y}_{r_j}\| \cap \mathcal{N}_i \neq \emptyset$ y $\bullet \bullet P_X \cap P_R \neq P_X^\bullet \cap P_R$. 2) $\exists p_i \in \|\mathbf{Y}_{r_i}\| \cap \mathcal{N}_i (P_X \cup \|\mathbf{Y}_{r_j}\|) \neq \emptyset$. 3) $\exists p_j \in \|\mathbf{Y}_{r_j}\| \cap \mathcal{N}_i (P_X \cup \|\mathbf{Y}_{r_i}\|) \neq \emptyset$.

El conjunto $P_X \subseteq P_S \cap \mathcal{N}_i$ existe debido a la intersección entre dos recursos en el modelo de red de Petri, no obstante debe ser un conjunto único. La segunda condición previene la existencia de más de un conjunto P_X en las zonas de los recursos de entrada y salida. Finalmente, para prevenir subconjuntos entre los recursos implicados, debe existir un conjunto de lugares particulares. Debe existir un lugar que no pertenece al P-Semiflujo del otro recurso implicado. Si las condiciones previas son cumplidas, existirá una superposición entre todos los recursos implicados y es llamado un equipo de recursos. Una red de Petri donde todos los recursos pertenecen a un equipo de recursos es una clase BORPN y adicionalmente es necesario que todos los lugares de un proceso pertenezcan a cualquier P-Semiflujo de los recursos del equipo. Finalmente, para cada transición donde el recurso del equipo es adquirido, existe un único camino, en la máquina de estado fuertemente conectada, para alcanzar cada transición donde el recurso del equipo es liberado.

Definición 9. (Las propiedades de un recurso de la clase BORPN). Una red de Petri es una clase BORPN si todos los recursos pertenecen a un Equipo y $\forall p_i \in P_S$ tal que $p_i \cap \|\mathbf{Y}_r\| = \emptyset, \forall r \in P_R$.

A continuación se muestran algunas características de la clase BORPN que se mencionan como restricciones:

- 1) El lugar reposo colapsa los estados inicial y final.
- 2) Las opciones entre el camino son permitidas, pero las iteraciones o bucles no.
- 3) Los recursos no pueden ser creados ni destruidos.
- 4) Los recursos son compartidos entre los caminos.
- 5) Los lugares recursos tienen solo una marca.
- 6) Un estado puede usar recursos simultáneamente.
- 7) El orden de la asignación de los recursos, debe ser el mismo orden para su liberación.

8) Las transiciones adquirirían o liberarían los recursos pero nunca ambos eventos a la vez.

El comportamiento de muchos sistemas puede ser descrito en términos de los estados del sistema, debido a que estos estados y sus cambios tienen un significado físico. Basado en esto podemos decir que una marcación inicial representa la ausencia de actividad en el sistema y el comienzo de los procesos. La clase BORPN es conservativa con los recursos debido al P-Semiflujo, todas las marcaciones alcanzables representarán estados posibles del sistema desde una marcación inicial aceptable. Las marcas en lugares P_{0i} representan la máxima cantidad de procesos esperando en la misma red de Petri o máquina de estados. Las marcas en lugares P_R modelan la disponibilidad de recursos, por consiguiente una marca es suficiente para representarlo. El lugar proceso P_S carece de marcas en el marcado inicial porque representa la ausencia de actividad en el sistema.

Definición 10. Consideremos que $\mathcal{N} = \langle P_0 \cup P_S \cup P_R, T, \mathbf{C} \rangle$ sea una red BORPN. Un marcado inicial \mathbf{m}_0 es aceptable para \mathcal{N} si y solo si:

- 1) $\forall i \in I_{\mathcal{N}}, \mathbf{m}_0[p_{0i}] > 0.$
- 2) $\forall p \in P_S, \mathbf{m}_0[p] = 0.$
- 3) $\forall r \in P_R, \mathbf{m}_0[r] = 1.$

Usualmente, para poder aplicar la política de control de prevención de bloqueos mutuos es necesario considerar la marcación inicial para el modelo de red de Petri. En nuestra política de control de evitación de bloqueos mutuos no se modifica el modelo de la red de Petri, por lo que la marcación inicial permanece sin cambios. Para aplicar nuestra política de control de prevención de bloqueo mutuos es necesario agregar recursos virtuales para hacer el modelo de la red de Petri libre de bloqueos mutuos los cuales mantendrán la misma marcación inicial que los recursos previos.

De igual forma, si se llega a agregar nuevos lugares de procesos, estos permanecen vacíos en la marcación inicial. Nuestra política de control de bloqueo mutuo no adiciona nuevos procesos al modelo de red de Petri, por lo que ningún lugar reposo será agregado.

3. Análisis de vivacidad para la clase BORPN

En esta sección, la propiedad de vivacidad es caracterizada por los sifones. Un sifón es un conjunto de lugares que si pierden sus marcas, permanecerán vacíos para siempre. Por lo que, todas las transiciones de salida

de los lugares del sifón vacío estarán deshabilitadas para siempre debido a que por lo menos un lugar de entrada (perteneciente al sifón) estará vacío para siempre. Los sifones vacíos representan una generalización de las esperas circulares, debido a que en un sifón podemos encontrar una estructura intrincada de ciclos superpuestos de recursos vacíos. En [12] se rompe los sifones al añadir recursos virtuales hasta obtener un modelo de la red de Petri libre de bloqueos mutuos. En otra aproximación, se evita que los sifones pierdan marcas utilizando funciones lógicas que garantizan la propiedad de vivacidad en el modelo de la red de Petri. La clase BORPN tiene diversas propiedades relacionadas con la estructura de los sifones y sus recursos implicados, por lo que se puede introducir el concepto de clase de red estructuralmente segura debido a la marcación binaria de los lugares procesos y los lugares recursos. La estructura de la clase BORPN garantiza que todos los estados en la red son alcanzables.

Definición 11. Un sistema de red de Petri \mathcal{N} es llamado clase Red Estructuralmente Segura sii para cada lugar $p \in P_R \cup P_S$, existe un P-Semiflujo $\mathbf{y} \in \mathbb{N}^{+|P_R \cup P_S|}$ tal que $p \in \|\mathbf{y}\|$ y $\mathbf{y} \cdot \mathbf{m}_0 \leq 1.$

Los siguientes resultados afirman que todos los vectores de marcado $\mathcal{R}(\mathcal{N}, \mathbf{m}_0) \setminus \{P_{0i}\} | i \in \mathbb{N}^{+|N|}$ excepto de los lugares reposo pertenecen al conjunto $\{0,1\}$. El lugar reposo satisface las condiciones necesarias para ser un lugar implícito porque todas sus transiciones de entrada tienen también otro lugar de entrada. Debido a esta característica el marcado de los lugares reposo podría ser generado desde el marcado de otros lugares. Para estas redes es posible el razonamiento a través de cálculos booleanos donde la manipulación de la marcación podría ser realizada utilizando la herramienta de los Diagramas de Decisión Binaria Ordinaria (OBBDs). Una estrategia es reducir el número de elementos que tienen que ser tratados simultáneamente lo cual produce una red bien definida, sin embargo la discusión de este método va más allá del alcance de este artículo.

Lema 1. Consideremos que $\langle \mathcal{N}, \mathbf{m}_0 \rangle$, $\mathcal{N} = \langle P_0 \cup P_S \cup P_R, T, \mathbf{C} \rangle$, sea una red de Petri BORPN. Consideremos que m sea una marca muerta, tal que $m \in \mathcal{RS}(\mathcal{N}, \mathbf{m}_0)$ y $\tau \subseteq T$ en el conjunto de transiciones

mueras que pertenecen a m . El conjunto τ cumple que $|\tau| > 1$.

Demostración. Probaremos el resultado por contradicción. Supongamos que $|\tau| = 1$ y existe una transición $t \in \tau$ que está muerta en un marcado $m \in \mathcal{RS}(\mathcal{N}, m_0)$. Como t es una marcación muerta implica que $t \in \bullet S_A | \bullet S_A \in r \bullet$ como establece el corolario 2, para esta t nosotros tenemos el estado \overline{mre} y mpe .

De mpe podemos disparar transiciones t mantenidas $\forall p \in S_p | m[p] \neq 0$ y m_0 podría ser alcanzado. Pero como $|\tau| = 1$ y sabiendo que el sistema está bien definido (por lo establecido en la definición 1) cualquier T-Semiflujo mínimo conteniendo t podría ser disparada desde m_0 que es una contradicción con t estando muerto en m . Esto contradice la hipótesis que $|\tau| = 1$ y podemos concluir que $|\tau| > 1$.

3.1 Teorema de vivacidad

La propiedad de vivacidad afirma que la ejecución del programa (proceso) eventualmente alcanza algún estado deseable. La propiedad de vivacidad y su caracterización estructural en la clase *BORPN* es una caracterización muy importante que apoya los siguientes resultados teóricos. El teorema 1 resume este resultado.

Teorema 1. La red \mathcal{N} está viva sii no existe un sifón vacío \mathcal{D} , donde $|\mathcal{D} \cap P_R| \geq 2$ y existe mpe , $p \in \mathcal{D}$ y \overline{mre} , $r \in \mathcal{D}$.

Demostración. Probaremos el resultado por contradicción.

\Rightarrow) Si $|\mathcal{D} \cap P_R| \geq 2$ entonces $\exists r_1, r_2 \in \mathcal{D}$ donde $r_1 \bullet = p'$ y $r_2 \bullet = p'$; $p, p' \in \mathcal{N}_i$ como r pertenece a la zona de un recurso $Z_{i,j}^r = \mathcal{H}_r \cap \mathcal{N}_i, i \in \mathbb{N}^{+|\mathcal{N}|}$ por definición 7 y dado que existe mpe podemos verificar que $\exists p'' | \bullet p'' = r_1 \bullet$ y $\exists p''' | \bullet p''' = r_2 \bullet$ donde $p'', p''' \in \mathcal{N}_j$ (existe tal p'' y p''' porque hay un arco desde r a t a p'' ; r_2 a t' y t' a p''' por construcción) pero como $y_r[r] = 1$ por definición 1, $\nexists mre$, $r \in \mathcal{D}$ por lo que \mathcal{D} está vacío y la red \mathcal{N} no está viva.

\Leftarrow) Si \overline{mpe} , $p \in \mathcal{D}$; mre , $r \in \mathcal{D}$ en $|\mathcal{D} \cap P_R| \geq 2$ entonces existe r , podemos disparar las transiciones $r \bullet$ para todas los procesos activos que satisfacen la condición $\bullet p = r \bullet$ pero como p pertenece a los portadores de r , por la definición 2 y hay más de un recurso en el sifón \mathcal{D} , esto declara que hay otro recurso

r' que satisface $p \in \mathcal{H}_{r'}$ en la red \mathcal{N} . Como $y_r[r] = 1$ entonces alcanzaremos un \overline{mre} , y mpe para $|\mathcal{D} \cap P_R| \geq 2$ y podemos concluir que es un sifón vacío.

3.2 Modelado de un algoritmo de encaminamiento

En esta subsección se mostrará un ejemplo de un sistema de transporte modelado a través de redes de Petri como una herramienta de síntesis y modelado. La figura 2.a muestra un sistema de transporte de objetos (objetos físicos o virtuales) compuestos de tres nodos o estaciones y dos canales duplex denominados C_A y C_B . Se puede deducir que si los nodos o estaciones de los extremos (1 y 3) desean enviar simultáneamente objetos, se puede generar un bloqueo mutuo en el nodo central. Es preciso mencionar que nosotros asumimos que el Nodo o Estación 2 está deshabilitado para enviar o recibir mensajes, pero habilitado para reenviar los mensajes a los Nodos o Estaciones restantes.

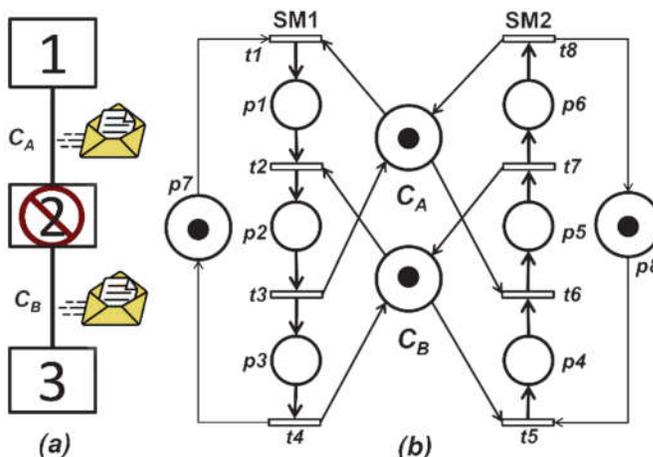


Figura 2. Modelado de un sistema de transporte a través de una clase BORPN.

La figura 2.b muestra una red de Petri con dos máquinas de estado SM1 y SM2, donde, la máquina SM1 modela el flujo de objeto desde el Nodo o Estación 1 hacia el Nodo o Estación 3. La máquina SM2 modela el flujo en la dirección inversa, eso significa, los objetos desde el Nodo o Estación 3 al Nodo o Estación 1. Desde nuestra perspectiva RAS, los recursos son los canales del sistema y están representados por los lugares de recurso que denominamos C_A y C_B y tienen una marca que indica cuando ellos esten disponibles o no. Esta red de Petri pertenece a la clase BORPN la cual es adecuada para el modelado de un amplio rango de Sistemas de

Asignación de Recursos que adquieren y liberan recursos en el mismo orden. Como mencionamos en el Teorema 1, la vivacidad de este tipo de redes está relacionada con la existencia de sifones que son insuficientemente marcadas en m . La red de la figura 2.b tiene un sifón D formado por los siguiente lugares $D = \{p_2, p_3, p_5, p_6, C_A, C_B\}$, donde no estan marcados con la marcación $m = p_1 + p_4$. Bajo esta marcación, las transiciones de salida de los lugares en el sifón t_2 y t_6 están muertos y los sifones D sin marcas. Evidentemente, hay un bloqueo mutuo y el sistema no garantiza la propiedad de vivacidad como la red de Petri muestra en el bloqueo.

4. Conclusiones

En este artículo hemos presentado una nueva clase de red de Petri orientada para tratar problemas de bloqueo mutuo en sistemas grandes que asignan recursos en forma unitaria y liberan estos en el mismo orden. La caracterización estructural para esta clase fue presentada a la vez que se ha demostrado el teorema de vivacidad. Aplicando análisis estructural sobre el modelo de red de Petri [9] somos capaces de caracterizar la propiedad de vivacidad a través de una estructura llamada sifón. El dominio de aplicación de esta nueva clase de red está orientada al análisis de algoritmos de encaminamiento en que recursos (canales) son asignados de forma unitaria a los procesos (mensajes) que parten de un origen a un destino predeterminado y siguiendo diversas rutas en una red de interconexión. Durante este recorrido emergen problemas de bloqueos debido al uso de compartido de los canales. Diversas aproximaciones pudieron ser usadas para enfrentar problemas de bloqueo mutuo [1], sin embargo una política de prevención utilizando canales virtuales es la opción más adecuada para los algoritmos de encaminamiento [12].

5. Agradecimiento

Este trabajo ha sido apoyado por la Universidad Tecnológica de Panamá.

6. Referencias

[1] F. Tricas, "Analysis, prevention and avoidance of deadlocks in sequential resource allocation systems," Ph.D. dissertation, Zaragoza. España. Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática, Universidad de Zaragoza. Mayo, 2003.
[2] F. Tricas and J. Ezpeleta, "Computing minimal siphons in petri net models of resource allocation systems: a parallel solution," Systems, Man and Cybernetics, Part A, IEEE Transactions on, vol. 36, no. 3, pp. 532–539, May 2006.

[3] Y.-S. Huang, "Deadlock prevention for sequence resource allocation systems," J. Inf. Sci. Eng., vol. 23, no. 1, pp. 215–231, 2007.
[4] E. Pastor, J. Cortadella, and O. Roig, "Symbolic analysis of bounded petri nets," Computers, IEEE Transactions on, vol. 50, no. 5, pp. 432–448, May 2001.
[5] K. Klai, S. Tata, and J. Desel, "Symbolic abstraction and deadlock-freeness verification of inter-enterprise processes," in Proceedings of the 7th International Conference on Business Process Management, ser. BPM '09. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, pp. 294–309.
[6] G. Ciardo, "Data representation and efficient solution: a decision diagram approach," in Proceedings of the 7th International Conference on Formal Methods for Performance Evaluation, ser. SFM'07. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, pp. 371–394. [Online]. Available: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1768017.1768026>
[7] F. Vallés, F. Tricas, J. Ezpeleta, and J. Colom, "Structurally safe net systems," R. Boel and G. Stremersch, Eds., Kluwer Academic Press. Kluwer Academic Press, 8 2000, pp. 441–448.
[8] E. Cano, A. Rovetto, and J. Colom, "On the computation of the minimal siphons of S^4PR nets from a generating family of siphons," 15th. IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation, September 2010.
[9] E. E. Cano, C. A. Rovetto, and J. M. Colom, "An algorithm to compute the minimal siphons in S^4PR nets," Discrete Event Dynamic Systems, vol. 22, no. 4, pp. 403–428, 2012.
[10] T. Murata, "Petri nets: Properties, analysis and applications," Proceed-ings of the IEEE, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, April 1989.
[11] E. G. Coffman, M. Elphick, and A. Shoshani, "System deadlocks," ACM Computing Surveys (CSUR), vol. 3, pp. 67–78, June 1971. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/356586.356588>
[12] C. A. Rovetto, E. E. Cano, and J. Colom, "Deadlock analysis in minimal adaptive routing algorithms using petri nets," Systems, Man, and Cybernetics, 2010 IEEE International Conference on, 10 2010.

Apéndice

Una red lugar/transición (red L/T), es una tupla $\mathcal{N} = \langle P, T, W \rangle$, donde W es una función total $W : (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}^+$, siendo P, T conjuntos no vacíos, finitos y disjuntos. Elementos pertenecientes a los conjuntos P y T son llamados respectivamente lugares y transiciones, o generalmente nodos. Las redes L/T pueden ser representadas como un grafo bipartito directo, donde los lugares (transiciones) son gráficamente denotados por círculos (rectángulos): dejemos que $p \in P, t \in T, u = W(p, t), v = W(t, p)$, hay un arco directo, etiquetado $u(v)$, comenzando en $p(t)$ y terminando en $t(p)$ si $u \neq 0$ ($v \neq 0$).

El preset (postset) o conjunto de nodos de entradas (salidas) $x \in P \cup T$ es denotado por $\bullet x$ (x^\bullet), donde $\bullet x = \{y \in P \cup T \mid W(y, x) \neq 0\}$ ($x^\bullet = \{y \in P \cup T \mid W(x, y) \neq 0\}$). El preset (postset) es un conjunto de nodos $X \in \text{bag}(P) \cup \text{bag}(T)$ es denotado por $\bullet X$ (X^\bullet),

donde $\bullet X = \{y \mid y \in \bullet x, x \in X\}$ ($X^\bullet = \{y \mid y \in x^\bullet, x \in X\}$).

Una red L/T generalizada es una red con pesos de arcos positivos. Si los pesos del arco son unitarios (i.e., W puede ser definido como una función total $(P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow \{0,1\}$) la red es llamada ordinaria. Una máquina de estado es una red ordinaria tal que para cada transición $t \in T$, $|\bullet t| = |t^\bullet| = 1$.

Sea $\mathcal{N} = \langle P, T, W \rangle$ una red L/T. Su (red inversa) $\mathcal{N}^r = \langle P, T, W^r \rangle$ es la misma red con sus arco invertidos, i.e. $W^r(p, t) = W(t, p)$ y $W^r(t, p) = W(p, t)$.

Un lugar con ciclo propio $p \in P$ es un lugar tal que $p \in p^\bullet$. Una red L/T pura (también una red L/T libre de ciclos propios) es una red sin lugares con ciclos propios. En redes L/T puras, la red puede ser también definida por la tupla $\mathcal{N} = \langle P, T, C \rangle$, donde C es llamada la matriz de incidencia, $C[p, t] = W(p, t) - W(t, p)$.

Una marca m de una red L/T \mathcal{N} es un vector $\mathbb{N}^{|P|}$, asignando un número finito de marcas $m[p]$ (llamadas marcas) a cada lugar $p \in P$. Las marcas son representadas por puntos negros dentro de los lugares. El soporte de una marca, $\|m\|$, es un conjunto de lugares que son marcados en m , i.e. $\|m\| = \{p \in P \mid m[p] \neq 0\}$.

Definimos una red L/T marcada (incluso un sistema de red L/T) como una tupla $\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$, donde \mathcal{N} es una red L/T, y m_0 es una marca para \mathcal{N} , también llamada marca inicial.

Sea $\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$ una red L/T marcada. Una transición $t \in T$ esa habilitada (disparable) si $\forall p \in \bullet t. m_0[p] \geq W(p, t)$, que es denotada por $m_0[t]$. El disparador de una transición habilitada $t \in T$ cambia el estado del sistema a $\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$, donde $\forall p \in P. m_1[p] = m_0[p] + C[p, t]$, y es denotado por $m_0[t]m_1$. Una secuencia de disparo σ desde $\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$ es una secuencia de transiciones no vacía $\sigma = t_1 t_2 \dots t_k$ tal que $m_0[t_1]m_1[t_2] \dots m_{k-1}[t_k]$. El disparado de σ es denotado por $m_0[\sigma]t_k$. Llamamos vector de conteo de disparado σ al mapeo de Parikh $\sigma \rightarrow \mathbb{N}^{|T|}$ (i.e. $\sigma[t]$ es igual al número de veces que t aparece en σ). El soporte de σ es denotado por $\|\sigma\|$.

Una marca m es alcanzable desde $\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$ si y solo si existe una secuencia de disparo σ tal que $m_0[\sigma]m$. El conjunto de alcanzabilidad $RS\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$ es un conjunto de marcas alcanzables, i.e. $RS\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle = \{m \mid \exists \sigma. m_0[\sigma]m\}$.

La ecuación de estado de red de una red L/T marcada $\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$ es una ecuación definida como

$m = m_0 + C \cdot \sigma$, donde $\sigma \geq 0$. Cada marca alcanzable guarda la ecuación de estado de la red, pero puede que existan soluciones para la ecuación las cuales no son marcas alcanzables. Por lo que nosotros llamaremos m una marca potencialmente alcanzable. El conjunto de alcanzabilidad potencial $PRS\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$ es definido como $PRS\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle = \{m \mid \exists \sigma \in \mathbb{N}^{|T|}. m = m_0 + C \cdot \sigma, \sigma \geq 0\}$.

Una transición $t \in T$ está viva si y solo si para cada marca alcanzable $m \in RS\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$, $\forall m' \in RS\langle \mathcal{N}, m \rangle$ tal que $m'[t]$. El sistema $\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$ está vivo si y solo si cada transición está viva. De otro modo, $\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$ está muerto. Una transición $t \in T$ está muerta si y solo si no hay marcas alcanzables $m \in RS\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$ tal que $m[t]$. El sistema $\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$ está en un bloqueo mutuo total si y solo si cada transición está muerta, i.e. ninguna transición es disparable. Un estado hogar m_k es una marca tal que es alcanzable desde cada marca alcanzable, i.e. $\forall m \in RS\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle. m_k \in RS\langle \mathcal{N}, m \rangle$. El sistema de red $\langle \mathcal{N}, m_0 \rangle$ es reversible si y solo si m_0 es un estado hogar.

Un p-semiflujo (t-semiflujo) es un vector $Y \in \mathbb{N}^{|P|}, Y \neq 0$ ($X \in \mathbb{N}^{|T|}, X \neq 0$), que es un anulador izquierdo (derecho) de la matriz de incidencia, $Y \cdot C = 0$ ($C \cdot X = 0$). El soporte de un p-semiflujo (t-semiflujo) es denotado $\|Y\|$ ($\|X\|$), y sus lugares (transiciones) se dicen que son cubiertos por Y (X). La red L/T \mathcal{N} es conservativa (consistente) si y solo si cada lugar (transición) es cubierto por un p-semiflujo (t-semiflujo). Un p-semiflujo mínimo (t-semiflujo mínimo) es un p-semiflujo (t-semiflujo) tal que el m.c.d. de sus componentes no nulos es uno y su soporte $\|Y\|$ ($\|X\|$) no es un superconjunto estricto del soporte de otro p-semiflujo (t-semiflujo).

Un camino π de una red L/T \mathcal{N} es una secuencia de nodos $\pi = x_1 x_2 \dots x_n$ tal que los componentes impares son lugares y los componentes pares transiciones, o viceversa, y para cada par (x_i, x_{i+1}) , $W(x_i, x_{i+1}) \neq 0$. Un camino elemental es un camino tal que $\forall i, j \in [1, n]. x_i \neq x_j$, excepto para $x_1 = x_n$ (lo cual es permitido). Un circuito general es un camino tal que $x_1 = x_n$. Un circuito elemental (o simplemente circuito) es a la vez un camino elemental y un circuito general.

Modelo de minería de texto aplicado a historiales clínicos electrónicos de pacientes de cuidados paliativos en Panamá

Text mining model applied to electronic medical records of palliative care patients in Panama

Denis Cedeño-Moreno¹, Miguel Vargas-Lombardo^{1*}

¹Grupo de Investigación en Salud Electrónica y Supercomputación, Universidad Tecnológica de Panamá,

¹denis.cedeno@utp.ac.pa, ¹miguel.vargas@utp.ac.pa

Resumen— La minería de texto se basa en la extracción de nuevo conocimiento a partir de datos no estructurados en lenguaje natural. La aplicación de técnicas de minería de texto para el dominio de la medicina, en especial de la información de los registros electrónicos de salud de los pacientes de cuidados paliativos, es una de las áreas más recientes y prometedoras de investigación para el análisis de datos textuales. Además podemos crear ontologías para describir la terminología y el conocimiento en un dominio dado. En una ontología se formaliza la conceptualización de un dominio que puede ser general o específico. En el trabajo proponemos un modelo para encontrar patrones de información relevante en los registros electrónicos de salud de los pacientes de las unidades de cuidados paliativos en Panamá, basados en la utilización de las fases de la minería de texto y el desarrollo de una ontología para descubrir conocimiento oculto.

Palabras claves— Conocimiento, cuidados paliativos, historia clínica electrónica, minería de texto, ontología.

Abstract— Text mining is based on new knowledge extraction from unstructured natural language data. The application of techniques of text mining for the domain of medicine, especially information from electronic health records of patients in palliative care is one of the most recent and promising research areas for the analysis of textual data. We may also create ontologies to describe the terminology and knowledge in a given domain. In an ontology, conceptualization of a domain that may be general or specific formalized. In the paper, we propose a model to find patterns of relevant information in the electronic health records of patients in palliative care units in Panama, based on the use phase of text mining and development of an ontology to discover hidden knowledge.

Keywords— Knowledge, palliative care, electronic health record, text mining, ontology.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 14 de junio de 2016

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

1. Introducción

Los seres humanos desde la antigüedad se han dedicado a recolectar en su momento semillas, frutas, herramientas, hoy nos hemos dado a la tarea de recolectar información. Dicha información la recolectamos en diferentes fuentes, ya sea en medios electrónicos o en papel común. Se sabe que el conocimiento [1], es un tesoro para los seres humanos y quien lo tiene posee el control de la situación.

Tener este conocimiento depende de la capacidad de los seres humanos de manejar ciertas tareas con la información, saber dónde buscarla, para resumir grandes

volúmenes de información y hacer de este el conocimiento necesario [2].

Con el desarrollo de tecnologías relacionadas con la información se puede acceder y analizar cantidades de conocimiento relacionado con la salud. Muchas de estas herramientas se basan en la extracción de conocimiento a partir de fuentes de información textuales mediante la aplicación de la lingüística computacional. La lingüística computacional, como se indica [3], se centra principalmente en el diseño de mecanismos que permiten a los computadores entender el lenguaje natural, así como diversas tareas de procesamiento de la información.

La minería de texto (MT) es una aplicación de la lingüística computacional y procesamiento de textos que tiene por objeto facilitar la identificación y extracción de nuevos conocimientos a partir de colecciones de documentos o corpus de textos.

El objetivo principal de este trabajo es presentar el diseño de un modelo para la extracción de conocimiento, basado en los procesos de la MT y el desarrollo de una ontología, y que a través de esta nos permita encontrar patrones y obtener información de las historias clínicas de los pacientes de unidades de cuidados paliativos en la República de Panamá. El resto de este manuscrito es estructurado de la siguiente manera: En la siguiente sección se describe la metodología para hacer este trabajo. Luego se muestran las experiencias del diseño del modelo propuesto. Después de eso, se presenta una discusión. Por último, señalamos las principales conclusiones de este trabajo.

2. Materiales y Métodos

2.1 Minería de Texto

Cada día una enorme cantidad de datos son generados [4,5] en las organizaciones de salud [6], es necesario el diseño y desarrollo de nuevas y potentes herramientas de procesamiento de la información, con el avance de las tecnologías relacionadas con la información se pueden acceder y analizar estos datos todos ellos relacionados con los registros electrónicos de salud del paciente [7].

Por lo tanto, es común hoy día para un especialista registrar los datos del paciente por vía electrónica [8], esto incluye no solo la información general del paciente, sino también lo relacionado con el diagnóstico, los resultados analíticos, pruebas funcionales y la medicación [9]. Manteniendo esta gran cantidad de información en formato digital se tienen tres ventajas principales: se mejora la calidad de la atención, se reduce el tiempo de trabajo del personal de salud, y se puede utilizar dicha información a través de sistemas automatizados, tales como la minería de textos [10].

MT [11,12] es el área de investigación más reciente del procesamiento de textos. Se define como el proceso de descubrir patrones interesantes y nuevos conocimientos en una colección de textos. Es decir la MT es responsable de descubrir nuevo conocimiento que no existía explícitamente en los textos [13]. Solo los

computadores pueden manipular rápidamente grandes cantidades de texto.

El proceso de MT consta de dos fases principales: pre procesamiento y la fase de descubrimiento [14]. En la primera fase, los textos se convierten en una especie de representación estructurada o semiestructurada a continuación se facilita el análisis, mientras que en la segunda fase las representaciones intermedias son analizadas con el fin de descubrir en ellas algunos patrones interesantes o nuevo conocimiento.

La MT es un área multidisciplinar [15], que ha experimentado un aumento exponencial en la producción de información. Junto con la tecnología de la información han dado lugar a la gestión de sistemas complejos y suministros de información para diversas tareas. Debido a que la mayor parte de la información (más del 80%) se encuentra actualmente almacenada en forma de texto, se cree que la MT [16], tiene un gran valor comercial y organizacional.

Otro contexto de gran importancia es la utilización de las herramientas de MT para la formación y la investigación. En estas áreas, hay una enorme cantidad de fuentes de información, difícil de manejar y seleccionar. De hecho, hay muchas publicaciones en papel que tratan de reunir lo más relevante que se produce en la publicación en determinadas áreas del conocimiento médico.

Procesar grandes volúmenes de texto no estructurado para extraer el conocimiento requiere la aplicación de una serie de técnicas que incluyen la Recuperación de Información (RI), Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN) [17,18,19,20], y la Extracción de Información (EI).

Los sistemas de RI identifican los documentos de una colección que coincide con la consulta del usuario, son los motores de búsqueda más populares utilizados por ejemplo en *Google*, que identifican los documentos en la *World Wide Web* que son relevantes para un determinado conjunto de palabras.

PLN es uno de los temas más antiguos y más difíciles en el campo de la inteligencia artificial. Es el análisis del lenguaje humano para lograr que las computadoras entiendan el lenguaje natural como lo hacen los humanos, el papel del PLN en la MT es proporcionar sistemas para la extracción de información de forma tal que los datos lingüísticos que se necesitan para realizar su tarea sean lo más adecuados posible.

El es el proceso de obtención automática de un documento estructurado a partir de datos del lenguaje natural. A menudo se trata de definir la forma general de la información que nos interesa como una o más plantillas, que luego se utilizan para guiar el proceso de extracción.

La información médica que está registrada en la Historia Clínica Electrónica (HCE) del paciente es muy valiosa. Además de su uso como parte de la historia del paciente en las unidades de cuidados paliativos, las HCE, pueden ser tratadas como un repositorio de información del paciente y proporcionarnos datos ricos. Las HCE están sólo a la espera de ser analizadas y procesadas para el descubrimiento del conocimiento clínico.

2.2 Minería de Texto e Historia Clínica Electrónica

Existe una importante fuente de datos que se puede utilizar para la investigación y para mejorar la calidad de los servicios de salud, inmersas en las HCE [21,22]. Las HCE han estado disponibles y debido a su nivel de detalle, están ganando aceptación para el uso de herramientas tecnológicas de procesamiento de la información.

Los médicos escriben sus comentarios en las HCE y varían de un sistema a otro, sin embargo, se suelen almacenar los siguientes datos: edad, sexo, diagnóstico, historial médico, los medicamentos con receta, exámenes de laboratorio, procedimientos clínicos, resultados, alergias, inmunizaciones, signos y observaciones vitales [23]. La información contenida puede estar en forma narrativa o forma semiestructurada [24,25]. Con ellos, se pueden realizar análisis y extraer información con el fin de mejorar tanto las tareas de la investigación médica y científica, así como los procedimientos al paciente.

Además de su uso clínico por el médico, las HCE, se puede utilizar como un repositorio para la información médica [26]. Los investigadores médicos [27] están en el umbral de una nueva era en la que las HCE están ganando un papel importante en el apoyo a las actividades diarias. Las herramientas de la informática y la gestión del conocimiento [28], son ahora parte del mundo de la ciencia biomédica [29].

Plataformas e infraestructuras de computación permiten nuevos tipos de experimentos que eran imposibles de hacer hace diez años. Los avances en el

área de tecnología de información para la salud (HIT) [30], sin duda, han permitido avances en la documentación del paciente. Los avances en HIT sin duda han transformado la forma en que se lleva a cabo el cuidado de la salud, sino que también ha cambiado la forma en que se está documentando datos de los pacientes [31]. Esta generación de los datos de salud electrónica es una gran promesa para contribuir significativamente a la salud de los pacientes, y también para transformar la investigación biomédica [32].

Hay un progreso significativo en los últimos años en la aplicación de técnicas de la MT y las HCE con el fin de hacer frente al gran volumen de información en el área de rápido crecimiento de la literatura médica. Sin embargo, es raro encontrar aplicaciones de MT en el área de sistemas de información clínica, el principal desafío para la MT en aplicaciones médicas en los próximos años es hacer este tipo de sistemas útiles para los investigadores. La MT ha surgido como una solución potencial para las HCE de pacientes que sufren de enfermedades tales como sistemas de cáncer [33].

2.3 Minería de Texto y HCE de pacientes con cáncer

La MT puede ayudar a adquirir conocimientos de una montaña de texto y su uso está hoy ampliamente extendido en la investigación biomédica [34]. Muchos investigadores han utilizado la tecnología MT para descubrir nuevos conocimientos y mejorar el desarrollo de la investigación biomédica, especialmente las relacionadas con enfermedades malignas como el cáncer.

Hay un recurso valioso en el contexto biomédico que podemos utilizar y se permite con mucho texto actual de los pacientes con cáncer que reciben tratamiento en hospitales en el país y que se almacenan en la HCE.

El cáncer es una enfermedad mortal que causó 7,4 millones de muertes en 2008 [35]. Por esta razón, el cáncer es una de las áreas más importantes de estudio para los investigadores biomédicos. Con tanto texto sobre esta enfermedad, es casi imposible para los médicos investigar todos estos documentos y descubrir nuevos conocimientos que sean significativos. La MT puede ayudar a los investigadores para completar esta difícil tarea.

El investigador puede constatar las ventajas de la MT y facilitar la investigación para ayudar en la

búsqueda de nuevos conocimientos, para el diagnóstico, tratamiento y prevención del cáncer [36].

La MT emplea muchas de las tecnologías informáticas, tales como el aprendizaje automático, inteligencia artificial, bioestadística, tecnología de la información, y el reconocimiento de patrones para encontrar nuevos resultados ocultos en texto de biomédica [37].

En los últimos años, la MT y el análisis estadístico [38] se han aplicado a grandes áreas de la medicina, debido a la existencia de grandes volúmenes de datos. El uso de estas herramientas permiten que el trabajo de los médicos y las decisiones sean más fáciles y más precisas, mejorando así el servicio que ofrecen, también proporcionan un mecanismo para transformar el texto en conocimiento. Por tal razón hemos decidido aplicar en nuestro proyecto algunas técnicas de MT para explorar, analizar, consultar y gestionar los datos de pacientes con cáncer del área de cuidados paliativos [39].

3. Escenario de estudio

3.1 Representación del conocimiento

Diversas áreas de convergencia del conocimiento [40], han llevado al diseño e implementación un sinnúmero de sistemas informáticos que apoyan la integración de bases de datos con información médica.

La informática médica tiene décadas de experiencia en el desarrollo de aplicaciones y en el procesamiento de la información de pacientes, y ha permitido contribuir al desarrollo de herramientas innovadoras en el campo tecnológico e incluye distintas áreas como la recuperación y la lingüística computacional [41]. A la extracción de conocimiento con el lenguaje natural y almacenamiento en bases de datos textuales, se conoce comúnmente como descubrimiento de conocimiento en texto (KDT) [42].

3.2 Rol del especialista en cuidados paliativos

Actualmente los médicos especialistas de cuidados paliativos tienen un registro completo de las actividades e interacciones de los pacientes y otros médicos involucrados en el proceso de evaluación [43]. Un análisis más detallado de este conjunto de actividades e

interacciones nos permite comprender lo que ocurrió con el paciente. Sin embargo, cuando se tiene una cantidad considerable de interacciones el análisis manual es prácticamente imposible debido a la tarea, el tiempo y el esfuerzo.

La aplicación de técnicas MT [44], al dominio de cáncer es una de las zonas más nuevas y más prometedoras de la investigación para el análisis de los datos [45].

3.3 Modelo propuesto

Nuestra herramienta permite analizar los elementos de texto de las HCE de pacientes de cuidados paliativos con el fin de identificar y ampliar los conocimientos de los especialistas.

Las funciones que debe cumplir principalmente una herramienta de MT incluyen: Identificar “hechos” y datos puntuales a partir del texto de los documentos; agrupar documentos similares lo que también se conoce como *clustering*; determinar temas abordados en los documentos mediante la categorización automática de los textos; identificar los conceptos tratados en los documentos y crear redes de conceptos; facilitar el acceso a la información repartida entre los documentos de la colección; visualización y navegación de colecciones de texto.

En nuestro proyecto de descubrir el conocimiento de los documentos de texto en los HCE de los pacientes de cuidados paliativos, debemos pasar por varias etapas importantes que inducirá este proceso [46]. Estas etapas se pueden ver en la Figura 1.

Pre-Proceso: En este paso se seleccionan aquellos términos que mejor representan los objetos de estudio, también se elimina información irrelevante y se llevarán a cabo las operaciones o transformaciones en el texto, para generar una representación semi estructurada lo que debe contribuir a facilitar el análisis.

Descubrimiento: Esta es la etapa en la que se analizarán las representaciones intermedias con el fin de descubrir en ellos algunos patrones interesantes o nuevos conocimientos, aplicando técnicas y algoritmos de minería.

Ver los resultados: Etapa donde los usuarios pueden observar y explorar los resultados.



Figura 1. Etapas de la Minería de Texto.

Una de las etapas más importantes y críticas de la MT es la estructuración del contenido, es decir lograr una representación o modelo intermedio del texto [47] sobre esta base es que pueden aplicarse los algoritmos o métodos de descubrimiento como las ontologías.

La forma más comúnmente utilizada hoy en día para la estructuración de contenido es el modelo de espacio vectorial, así como taxonomías de conceptos y grafos [48].

Consideramos hacer frente en este proyecto al proceso de la estructuración del contenido manejándolo con la aplicación de un nuevo modelo, ya que encontrar nuevas alternativas para la representación o estructuración de textos [49], permite la innovación en la recuperación de la información, y logra que se faciliten los procesos que nos lleven a descubrir el conocimiento.

El proceso de la estructuración [50], lo manejaremos en varias fases, la primera fase del nuevo modelo, estará basada en una aplicación desarrollada en lenguaje de programación Java, con la utilización de clases especializadas para separar o romper los elementos de una cadena de texto, la *tokenización*, que recibe como entrada el archivo de texto y produce una salida compuesta de *tokens* o símbolos.

En este sentido, se define una primera aproximación de un modelo de representación de textos, así como un método para su construcción de forma automática. Este modelo se puede ver en la Figura 2.

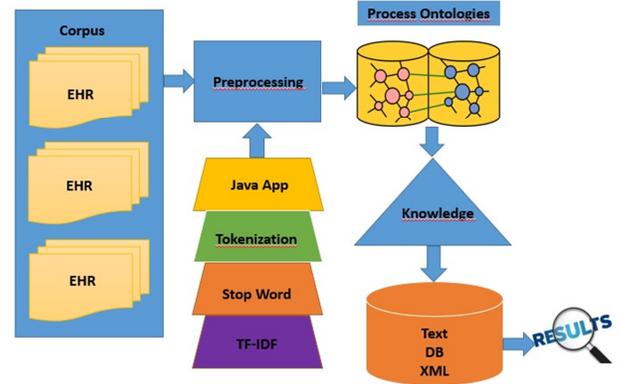


Figura 2. Modelo Propuesto.

En el modelo la entrada está dada por un archivo de texto con el corpus de lo que se desea procesar, este archivo de texto contendrá los comentarios hechos por los médicos especialistas de cuidados paliativos, específicamente el área donde se especifican las observaciones realizadas al paciente en la HCE.

Como se ha señalado dentro de la HCE de cada paciente que asiste a la unidad de cuidados paliativos y es atendido por un médico especialista, se detallan cada una de estas observaciones. Deseamos reunir una muestra considerable de un grupo de pacientes para ser almacenadas en este archivo (corpus) que funcionará como elemento de entrada al proceso.

Una vez obtenido el archivo y a través de una aplicación hecha en lenguaje de programación Java y utilizando herramientas como las clases de *tokenización* leeremos el archivo al cual lo iremos separando en unidades básica (palabra a palabra) hasta formar una nueva estructura.

Esta estructura nueva que contendrá los diferentes elementos de nuestro corpus la almacenaremos en un archivo de texto. Luego pasará por una fase que logre eliminar los conceptos o elementos con menor importancia o relevancia para nosotros, debido a que no todas las palabras de nuestras HCE son igualmente representativas del corpus que vamos a evaluar.

Lo que en esencia estamos realizando es un análisis léxico de nuestro texto inicial, cuyo propósito es el tratamiento de números, guiones, signos de puntuación, palabras mayúsculas o minúsculas, nombres propios. Luego son eliminados los conceptos que tengan menor relevancia, en cuanto a su vínculo contextual con el

resto de los conceptos, es lo que se conoce como palabras vacías.

Lo que tenemos es una lista de palabras relevantes para nuestro proyecto, a cada palabra le vamos a asignar distintos pesos. Para ello vamos a utilizar las técnicas del modelo de ponderación TF-IDF (*term frequency-inverse document frequency*) [51] para poder evaluar la importancia de cada palabra en el corpus de documentos.

En la segunda fase nos vamos a enfocar en deducir el conocimiento a través de la identificación de patrones e información. Revelando conocimiento implícito que no es perceptible desde un solo documento, sino a partir de una serie de documentos.

Es una realidad que hoy una gran cantidad de herramientas de MT utilizan las ontologías [52] para la búsqueda de conocimiento. En las ontologías, las palabras describen conceptos que definen de manera formal las relaciones y las reglas que especifican las dependencias entre los conceptos. Las ontologías se utilizan para estructurar y categorizar la información específica de un dominio.

Muchas aplicaciones TM han implementado ontologías [53] en sus flujos de trabajo para estructurar su estrategia de búsqueda, visualización y clasificación de la información.

Consideramos que desarrollando una ontología específica con la información de los HCE de pacientes de cuidados paliativos lograremos la recuperación de conocimientos [54] de este corpus. Las ontologías permiten la expansión de consultas, la reformulación de una consulta para mejorar el rendimiento de la recuperación de palabras clave.

La utilización de una ontología [55] en el proyecto, se enfocará en organizar de manera sistemática el conocimiento a partir de un conjunto de términos, conceptos y relaciones entre ellos. Debido a que las ontologías definen y establecen relaciones complejas, incorporan reglas y axiomas que no tienen otros elementos de naturaliza lingüísticos, obteniendo una representación formal de los conceptos y las relaciones existentes entre ellos.

4. Conclusión y trabajos futuros

Se dispone en la actualidad de gran cantidad de información en el área médica como bien se ha señalado. Sin embargo, existe un problema inherente a

tal volumen de datos: su procesamiento. Ya sea a través de la recuperación selectiva o la interpretación se hacen prácticamente imposibles para un profesional si emplea los métodos clásicos.

Lo que hace vital la construcción de herramientas tecnológicas que lo ayuden en estas tareas. En ese escenario, el uso de herramientas como la minería de textos o las ontologías adquiere una relevancia fundamental. Estas herramientas, que han tenido ya un papel importante en otros campos del saber, se han empezado a utilizar recientemente en la medicina.

Como trabajo futuro se tiene contemplado el análisis de los algoritmos de MT, así como el desarrollo de la ontología que logre la extracción de conocimiento.

5. Reconocimiento

Nuestro agradecimiento al apoyo del Grupo de Electrónica de Investigación y Salud de Supercomputación de la Universidad Tecnológica de Panamá, especialmente su director el Dr. Miguel Vargas-Lombardo por su asesoramiento.

6. Referencias

- [1] S. M. Allameh and S. M. Zare, "Examining the impact of KM enablers on knowledge management processes", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 3, pp. 1211–1223, 2011.
- [2] M. Terzieva, "Project Knowledge Management: How Organizations Learn from Experience", *Procedia Technol.*, vol. 16, pp. 1086–1095, 2014.
- [3] K. a. Dill, A. Lucas, J. Hockenmaier, L. Huang, D. Chiang, and A. K. Joshi, "Computational linguistics: A new tool for exploring biopolymer structures and statistical mechanics" *Polymer (Guildf)*, vol. 48, no. 15, pp. 4289–4300, 2007.
- [4] N. Zhong, S. Member, Y. Li, and S. Wu, "Effective pattern discovery for text mining", 2010.
- [5] H. Hashimi, A. Hafez, and H. Mathkour, "Selection criteria for text mining approaches", *Comput. Human Behav.*, vol. 51, pp. 729–733, 2015.
- [6] T. Suzuki, H. Yokoi, S. Fujita, and K. Takabayashi, "Automatic DPC code selection from electronic medical records: Text mining trial of discharge summary", *Methods Inf. Med.*, vol. 47, pp. 541–548, 2008.
- [7] Y. H. Tseng, C. J. Lin, and Y. I. Lin, "Text mining techniques for patent analysis" *Information Processing & Management.* vol. 43, no. September, pp. 1216–1247, 2007.
- [8] S. Ananiadou, D. B. Kell, and J. Tsujii, "Text mining and its potential applications in systems biology." *Trends Biotechnol.* vol. 24, no. 12, pp. 571–579, 2006.
- [9] S. Ananiadou and J. McNaught, "Text Mining for Biology and Biomedicine" *Comput. Linguist.* vol. 33, pp. 135–140, 2006.
- [10] G. Akçapınar, "How automated feedback through text mining changes plagiaristic behavior in online assignments" *Comput. Educ.*, vol. 87, pp. 123–130, 2015.

- [11] Q. Mei and C. Zhai, "Discovering evolutionary theme patterns from text: an exploration of temporal text mining" *Proc. Elev. ACM SIGKDD Int. Conf. Knowl. Discov. data Min.*, pp. 198–207, 2005.
- [12] H.-C. Yang, C.-H. Lee, and H.-W. Hsiao, "Incorporating Self-Organizing Map with Text Mining Techniques for Text Hierarchy Generation" *Appl. Soft Comput.*, vol. 34, pp. 251–259, 2015.
- [13] J. I. Guerrero, C. León, I. Monedero, F. Biscarri, and J. Biscarri, "Improving Knowledge-Based Systems with statistical techniques, text mining, and neural networks for non-technical loss detection" *Knowledge-Based Syst.*, vol. 71, pp. 376–388, 2014.
- [14] H. Mahgoub, H. Mahgoub, N. Ismail, N. Ismail, F. Torkey, and F. Torkey, "A Text Mining Technique Using Association Rules Extraction" *World Health*, pp. 21–28, 2008.
- [15] H. (National U. of S. Liu, H. (Osaka U. Motoda, R. Setiono, and Z. Zhao, "Feature Selection an ever evolving frontier in Data Mining" *J. Mach. Learn. Res. Work. Conf. Proc. 10 Fourth Work. Featur. Sel. Data Min.*, pp. 4–13, 2010.
- [16] M. Reinberger and P. Spyns, "Unsupervised text mining for the learning of dogma-inspired ontologies" *Ontol. Learn. from Text Methods, Appl. Eval.*, no. September, pp. 29–43, 2005.
- [17] M. Krallinger, R. a a Erhardt, and A. Valencia, "Text-mining approaches in molecular biology and biomedicine" *Drug Discov. Today*, vol. 10, no. 6, pp. 439–445, 2005.
- [18] T. Baldwin, P. Cook, B. Han, A. Harwood, S. Karunasekera, and M. Moshtaghi, *A Support Platform for Event Detection using Social Intelligence*. 2012.
- [19] Y. Yang, L. Akers, T. Klose, and C. Barcelon Yang, "Text mining and visualization tools - Impressions of emerging capabilities" *World Pat. Inf.*, vol. 30, no. September 2015, pp. 280–293, 2008.
- [20] A. Stavrianou, P. Andritsos, and N. Nicoloyannis, "Overview and semantic issues of text mining" *ACM SIGMOD Rec.*, vol. 36, no. 3, p. 23, 2007.
- [21] D. J. Berndt, J. a. McCart, D. K. Finch, and S. L. Luther, "A Case Study of Data Quality in Text Mining Clinical Progress Notes" *ACM Trans. Manag. Inf. Syst.*, vol. 6, no. FEBRUARY, pp. 1–21, 2015.
- [22] P. Lependu, S. V Iyer, C. Fairon, and N. H. Shah, "Annotation Analysis for Testing Drug Safety Signals using Unstructured Clinical Notes", *J. Biomed. Semantics*, vol. 3 Suppl 1, no. Suppl 1, p. S5, 2012.
- [23] S. L. West, W. Johnson, W. Visscher, M. Kluckman, Y. Qin, and A. Larsen, "The challenges of linking health insurer claims with electronic medical records", *Health Informatics J.*, vol. 20, pp. 22–34, 2014.
- [24] R. Cohen, M. Elhadad, and N. Elhadad, "Redundancy in electronic health record corpora: analysis, impact on text mining performance and mitigation strategies", *BMC Bioinformatics*, vol. 14, p. 10, 2013.
- [25] S. Tanuja, D. Acharya, and K. R. Shailesh, "Comparison of different data mining techniques to predict hospital length of stay" *J. Pharm. Biomed. Sci.*, vol. 07, no. 07, 2011.
- [26] N. Ramakrishnan, D. Hanauer, B. Keller, and B. Ramakrishnan, N., Hanauer, D., & Keller, "Mining electronic health records" *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 43, no. October, pp. 77–81, 2010.
- [27] M. Kvist, M. Skeppstedt, S. Velupillai, and H. Dalianis, "Modeling human comprehension of Swedish medical records for intelligent access and summarization systems - Future vision, a physician perspective" *9th Scand. Conf. Heal. Informatics*, 2011.
- [28] I. Fatima, M. Fahim, D. Guan, Y.-K. Lee, and S. Lee, "Socially interactive CDSS for u-life care" *Proc. 5th Int. Confernece ubiquitous Inf. Manag. Commun.*, no. September 2015, pp. 1–8, 2011.
- [29] R. Harpaz, A. Callahan, S. Tamang, Y. Low, D. Odgers, S. Finlayson, K. Jung, P. LePendu, and N. H. Shah, "Text Mining for Adverse Drug Events: the Promise, Challenges, and State of the Art" *Drug Saf.*, no. September 2015, 2014.
- [30] Holzinger, R. Geierhofer, F. Mödritscher, and R. Tatzl, "Semantic Information in Medical Information Systems: Utilization of Text Mining Techniques to Analyze Medical Diagnoses" *J. Univers. Comput. Sci.*, vol. 14, no. 22, pp. 3781–3795, 2008.
- [31] M. Andrade-Navarro and C. Perez-Iratxeta, "Text mining of biomedical literature: Doing well, but we could be doing better" *Methods*, vol. 74, pp. 1–2, 2015.
- [32] R. a A. Seoud and M. S. Mabrouk, "TMT-HCC: A tool for text mining the biomedical literature for hepatocellular carcinoma (HCC) biomarkers identification" *Comput. Methods Programs Biomed.* vol. 112, no. 3, pp. 640–648, 2013.
- [33] I. Spasic, J. Livsey, J. a Keane, and G. Nenadic, "Text mining of cancer-related information: Review of current status and future directions" *Int. J. Med. Inform.*, vol. 83, pp. 605–623, 2014.
- [34] B. Xie, Q. Ding, H. Han, and D. Wu, "MiRCancer: A microRNA-cancer association database constructed by text mining on literature" *Bioinformatics*, vol. 29, pp. 638–644, 2013.
- [35] Y.-C. Fang, H.-C. Huang, and H.-F. Juan, "MeInfoText: associated genemethylation and cancer information from text mining" *BMC Bioinformatics*, vol. 9, p. 22, 2008.
- [36] Who, "World Health Statistics 2009" p. 149, 2009.
- [37] A. Korhonen, I. Silins, L. Sun, and U. Stenius, "The first step in the development of Text Mining technology for Cancer Risk Assessment: identifying and organizing scientific evidence in risk assessment literature." *BMC Bioinformatics*, vol. 10, p. 303, 2009.
- [38] R. Jelier, M. J. Schuemie, A. Veldhoven, L. C. J. Dorssers, G. Jenster, and J. a Kors, "Anni 2.0: a multipurpose text-mining tool for the life sciences" *Genome Biol.*, vol. 9, no. 6, p. R96, 2008.
- [39] H. C. Beck, *Mass spectrometry in epigenetic research*, vol. 593, 2010.
- [40] H. Chen, R. H. L. Chiang, and V. C. Storey, "Business Intelligence and Analytics: From Big Data to Big Impact" *Mis Q.*, vol. 36, no. 4, pp. 1165–1188, 2012.
- [41] D. Chiang, "Hierarchical Phrase-Based Translation" no. May 2006, 2007.
- [42] W. W. M. Fleuren and W. Alkema, "Application of text mining in the biomedical domain" *Methods*, vol. 74, pp. 97–106, 2015.
- [43] N. B. Ngwenya and S. Mills, "The use of weblogs within palliative care: A systematic literature review" *Health Informatics J.*, vol. 20, pp. 13–21, 2014.
- [44] W. Der Yu and J. Y. Hsu, "Content-based text mining technique for retrieval of CAD documents" *Autom. Constr.*, vol. 31, pp. 65–74, 2013.
- [45] A. Jimeno Yepes and R. Berlanga, "Knowledge based word-concept model estimation and refinement for biomedical text mining" *J. Biomed. Inform.* vol. 53, pp. 300–307, 2014.
- [46] A. Hotho, A. Nürnberger, and G. Paaß, "A Brief Survey of Text Mining" *LDV Forum - Gld. J. Comput. Linguist. Lang. Technol.*, vol. 20, pp. 19–62, 2005.
- [47] V. C. Pande and A. S. Khandelwal, "A Survey Of Different Text Mining Techniques," *IBMRD's J. Manag. Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 125–133, 2014.

- [48] M. M. Mostafa, "More than words: Social networks' text mining for consumer brand sentiments" *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 10, pp. 4241–4251, 2013.
- [49] H. Shatkay, S. Brady, and A. Wong, "Text as data: Using text-based features for proteins representation and for computational prediction of their characteristics" *Methods*, vol. 74, pp. 54–64, 2015.
- [50] D. Munková, M. Munk, and M. Vozár, "Data pre-processing evaluation for text mining: Transaction/sequence model" *Procedia Comput. Sci.*, vol. 18, pp. 1198–1207, 2013.
- [51] U. Erra, S. Senatore, F. Minnella, and G. Caggianese, "Approximate TF-IDF based on topic extraction from massive message stream using the GPU" *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 292, pp. 143–161, 2015.
- [52] B. M. Konopka, "Biomedical ontologies—A review," *Biocybern. Biomed. Eng.*, vol. 35, no. 2, pp. 75–86, 2015.
- [53] T. R. Inness, J. R. Lee, M. Light, M. a. Grassi, G. Thomas, and A. B. Williams, "Towards applying text mining and natural language processing for biomedical ontology acquisition" *Proc. 1st Int. Work. Text Min. Bioinforma. - TMBIO '06*, p. 7, 2006.
- [54] D. Cedeño and M. Vargas-lombardo, "Framework Based on Ontologies for Palliative Care of Patients with Breast Cancer" vol. 37, no. 3, pp. 49–57, 2015.
- [55] I. Peñalver-Martinez, F. Garcia-Sanchez, R. Valencia-Garcia, M. Á. Rodríguez-García, V. Moreno, A. Fraga, and J. L. Sánchez-Cervantes, "Feature-based opinion mining through ontologies" *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 13, pp. 5995–6008, 2014.

Análisis, Síntesis y Aplicación de Circuitos Ópticos Birrefringentes Tipo FIR de Dos Puertos en Celosía con Cristales Líquidos

Analysis, Synthesis and Application of Lattice Two Port FIR type Birefringent Optical Circuits with Liquid Crystals

Salvador Vargas¹, Jorge Rodríguez², Raymond Quintero³, Luis Méndez⁴, Miguel Hernández⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá

¹ salvador.vargas@utp.ac.pa, ² jorge.rodriguez13@utp.ac.pa, ³ raymond.quintero@utp.ac.pa, ⁴ luis.mendez@utp.ac.pa, ⁵ miguel.hernandez1@utp.ac.pa

Resumen— Los cristales líquidos los encontramos en gran variedad de equipos a nuestro alrededor. Sus aplicaciones más comunes son de pantallas demostradoras en los equipos tales como calculadoras, televisores o computadoras. Sin embargo, también tienen otras aplicaciones menos conocidas como sensores de temperatura, como elementos de realimentación distribuida en láseres, materiales dieléctricos con permitividades sintonizables, como componentes de relleno en fibras de cristal fotónico con el punto de dispersión cero sintonizables, controladores de polarización, hasta en el filtrado de señales ópticas. En este artículo se estudia la aplicación de este tipo de componentes al filtrado de señales ópticas. Se presenta y se analiza un circuito óptico tipo FIR en estructura en celosía que utiliza cristales líquidos para el filtrado de señales ópticas y la forma en que se sintetiza el mismo, basados en las técnicas del procesado de señales en tiempo discreto, además se da una novedosa aplicación del mismo, ilustrándose mediante un ejemplo. En este artículo primero se ve una introducción a la radiación electromagnética además de explicar las técnicas de las matrices de transferencia ópticas. Se da una breve explicación sobre la polarización de la luz. Posteriormente se presentan los tipos de cristales líquidos más utilizados que existen en la actualidad. Se analiza el comportamiento de la luz en un circuito con dos entradas y dos salidas en su recorrido a través de células de cristal líquido nemático con alineación homogénea, además de presentar las ecuaciones necesarias para la síntesis de filtros ópticos con funciones de transferencia arbitrarias. Finalmente se presenta un ejemplo de aplicación novedoso, en el área de las comunicaciones ópticas, donde se ecualiza el espectro de emisión estimulada de un amplificador óptico de fibra dopada con Erblio.

Palabras Claves— circuito óptico, cristal líquido nemático, estructura en celosía, para-hermitiano, polarización.

Abstract— Liquid crystals are found in a variety of equipment around us. Its most common applications are demonstrative displays in calculators, TVs or computers. However, also have other less popular applications such as temperature sensors, elements of distributed-feedback on lasers, dielectric materials with tunable permittivity, as fill component in photonic crystal fibers with tunable zero dispersion point, polarization controllers, even in optical signals filtering. In this article we study the application of this type of components to the filtering of optical signals. We present and analyzing a FIR type optical circuit with lattice structure that uses liquid crystals for filtering optical signals and the form of synthesize it, based on the techniques of discrete-time signal processing, also a novel application of it is done, illustrating it with an example. In this article first we do an introduction to electromagnetic radiation and an explanation of the techniques of optical transfer matrices. A brief explanation of light polarization is given. Subsequently the most commonly used liquid crystals types that currently exist are presented. We discuss the light behavior in a circuit with two inputs and two outputs while light go through of nematic liquid crystals cells with homogeneous alignment, as well as the necessary equations for the synthesis of optical filters with arbitrary transfer functions. Finally, we present a novel application example, in optic communications area where an equalization of the spontaneous emission of an Erbium doped fiber optical amplifier, is done.

Keywords— optical circuit, nematic liquid crystal, lattice structure, para-hermitian, polarization.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 7 de marzo de 2016

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

1. Introducción

Los filtros ópticos son importantes en un gran número de aplicaciones en campos que van desde las comunicaciones ópticas hasta la astronomía. Los mismos pueden formar parte de multiplexores, demultiplexores [1] - [2], conmutadores, moduladores, matrices de conmutación óptica [3], o trabajar como filtros ecualizadores de ganancia de amplificadores, compensadores de dispersión [4], o filtros para comunicaciones WDM [5]. La respuesta en frecuencia de cada una de estas aplicaciones es diferente, y tiene que ser ajustada de acuerdo a las necesidades requeridas en la aplicación.

Esta necesidad ha impulsado el desarrollo de técnicas de diseño que permiten sintetizar, en circuitos ópticos, las funciones de transferencia que generan las respuestas en frecuencia particulares requeridas en cada una de estas aplicaciones. Entre estas destacan las basadas en el procesamiento de señales, que mediante técnicas recurrentes permiten la síntesis de filtros de respuesta finita al impulso (FIR) y de respuesta infinita al impulso (IIR) [6]. Estas técnicas, al igual que su contraparte digital, solo pueden sintetizar funciones de transferencia periódicas, sin embargo, recientemente se han desarrollado técnicas que combinando dispositivos con funciones de transferencia no periódicas y estructuras resonantes ópticas tipo IIR, permiten la síntesis de filtros ópticos no periódicos [7].

Por otro lado, los cristales líquidos, tienen aplicaciones que van desde las muy conocidas, en pantallas de calculadoras, computadoras, televisores, juegos electrónicos, televisores, etc., hasta aplicaciones más desconocidas como su utilización en termometría, termografía, como parte de paneles solares, o en la implementación de filtros ópticos birrefringentes.

Los filtros ópticos birrefringentes utilizan las propiedades de birrefringencia de ciertos materiales como cristales de cuarzo, niobato de litio (cristales con alta birrefringencia), para generar filtros de banda estrecha. Soluciones conocidas de este tipo de filtros son la familia de filtros Lyot-Ohman [8], [9] y los filtros Solc [8], [10]. Ambos tipos de filtros utilizan apilamientos de láminas de retardo (láminas con propiedades birrefringentes) de entre 0.5 – 5 Amstrongs de espesor y polarizadores, en diferentes configuraciones, para lograr este objetivo. Lyot desarrolló su filtro [9], utilizando una configuración

alternada de retardadores y polarizadores, en donde cada lámina sucesiva tenía el doble del espesor que la anterior y los ejes ópticos (ordinario y extraordinario) formaban un ángulo de 45 grados con respecto a los ejes cartesianos (horizontal y vertical). En contraste los filtros Solc, en sus dos variantes, plegada y abanico, solo utilizan dos polarizadores, uno al principio y otro al final, y el espesor de las láminas retardadoras es el mismo. En cuanto al ángulo de los ejes ópticos con respecto a los ejes cartesianos, en la configuración plegada el mismo se alterna, a valores positivos y negativos, pero siempre manteniendo el mismo módulo, mientras que en la de abanico el ángulo no se alterna en signo, sino que se incrementa por un valor constante para cada lámina retardadora subsiguiente. Estos filtros, sin embargo, generan respuestas en frecuencias ópticas fijas, y no permiten la síntesis de funciones de transferencia arbitrarias.

Los cristales líquidos son materiales ideales para ser utilizados en filtros birrefringentes sintonizables debido a características tales como una alta anisotropía óptica (alta birrefringencia), lo que permite su utilización como láminas retardadoras, y bajo voltaje de operación que los hace baratos y confiables [11]. Incluso los polarizadores utilizados en los mismos pueden ser implementados incluyendo colorantes dicroicos en células del cristal con alineación homogénea.

En este trabajo se presenta el análisis genérico de un circuito óptico formado por un polarizador a la entrada, seguido de células de cristal líquido apiladas de manera consecutiva, funcionando cada una de estas como láminas retardadoras. Se explica cómo este circuito se puede utilizar para sintetizar funciones de transferencia ópticas para diferentes aplicaciones, utilizando las herramientas desarrolladas para el procesamiento de señales. Y se presenta una aplicación novedosa del mismo, en donde se sintetiza en este circuito la función de transferencia de un ecualizador de ganancia de un amplificador óptico de fibra dopada con Erbio.

Para lograr este objetivo, primero se presenta una introducción a la radiación electromagnética y las matrices de transferencia ópticas. Luego se da un repaso de la polarización de la luz, se hace una introducción a los tipos de cristales líquidos más utilizados en la actualidad, además de describir las células de cristal líquido que se utilizan como retardadores. Posteriormente se presenta y analiza el

circuito óptico que se utilizará, y se da una descripción de como se puede utilizar métodos de síntesis desarrollados en el mismo. Para finalmente presentar un ejemplo de aplicación novedoso utilizando el mismo.

2. La radiación electromagnética

El objetivo de esta sección no es dar un análisis matemático completo de la radiación electromagnética, sino darle al lector una introducción de la naturaleza de la radiación electromagnética y de sus características. Para un análisis matemático detallado puede ver [12].

Para entender las radiaciones electromagnéticas, hay que ver los puntos de vista opuestos (ahora aceptados) que han coexistido a lo largo de la historia para explicar los fenómenos de la luz visible, una forma de onda electromagnética. En el siglo XVII, Isaac Newton defendió la teoría de que la luz son partículas (Teoría Corpuscular). En esos mismos años, Huygens y Hooke (combativos rivales de Newton) apoyaron la hipótesis de que la luz es una onda (Teoría Ondulatoria). Ambas teorías aportaban experimentos que corroboraban el modelo. La teoría sobre una naturaleza corpuscular de la luz, sustentada por el enorme prestigio de Newton, prevaleció durante el siglo XVIII, pero debió ceder hacia mediados del siglo XIX frente a la teoría ondulatoria que fue contrastada con éxito con la experiencia. En la física actual, el descubrimiento de nuevos fenómenos ha llevado (sin arrinconar la teoría ondulatoria) a una conciliación de ambas ponencias teóricas. El punto de vista actual es aceptar el hecho de que la luz posee una doble naturaleza que explica de forma diferente los fenómenos de la propagación de la luz (naturaleza ondulatoria) y de la interacción de la luz y la materia (naturaleza corpuscular). Esta dualidad onda/partícula, postulada inicialmente para la luz, se aplica en la actualidad de manera generalizada para todas las partículas materiales y constituye uno de los principios básicos de la mecánica cuántica.

La radiación electromagnética es una forma de energía radiante que se propaga en el espacio mediante paquetes pequeños llamados cuantos o fotones. Esta es emitida y absorbida por partículas cargadas, cuando interactúa con la materia. Esta radiación es una onda de naturaleza transversal y vectorial, que en el vacío se propaga normalmente en línea recta a una velocidad característica, la velocidad de la luz, que es aproximadamente 3×10^8 m/s. Además esta onda

electromagnética posee un campo eléctrico y un campo magnético los cuales oscilan uno perpendicularmente al otro, y ambos perpendiculares a la dirección de propagación de la onda y la energía, descritos por el vector de Poynting. Para ondas planas armónicas, la periodicidad espacial de la onda se llama longitud de onda λ , y la periodicidad temporal, el cual es igual al inverso de la frecuencia f , periodo. La velocidad de la luz para estas viene dada por $v = \lambda f$. La razón de la velocidad de la luz en el vacío con respecto a la velocidad de la luz en el medio es el índice de refracción $n = c/v$. Y la energía transportada por cada fotón es proporcional a la frecuencia del mismo a través de la constante de Planck h , que vale $6.6235 \cdot 10^{-34}$ J·s.

En nuestro estudio nos interesa más el enfoque ondulatorio de la luz, ya que los fenómenos de interferencia y polarización, necesarios para comprender el funcionamiento del circuito óptico aquí tratado, son explicados a través de esta teoría. Fue Christiaan Huygens, el padre de la teoría ondulatoria, el que concluyó que la luz se retrasa al entrar a un medio más denso [12], el que derivó las leyes de reflexión y refracción, y que incluso explicó el fenómeno de la doble refracción de la calcita, usando su teoría ondulatoria. El que descubrió el fenómeno de la polarización cuando estaba trabajando con esta, fenómeno que abordaremos posteriormente.

3. Matrices de transferencia

Las matrices de transferencia ópticas, son una técnica utilizada en el cálculo de los sistemas ópticos para relacionar los campos de un lado, en una red de dos puertos óptica, con los del otro. Esta técnica provee un mecanismo formal para describir un sistema óptico complejo. En nuestro caso, el sistema óptico es descrito por una matriz 2×2 llamada matriz de transferencia, expresada en el dominio de la transformada Z .

Un caso especial de estas matrices de transferencia son las matrices de Jones. Estas son matrices 2×2 que actúan sobre los vectores de Jones, los cuales son vectores que describen el estado de polarización de luz. Los mismos se aplican solo a ondas polarizadas, en contraste de los vectores de Stokes que también pueden ser aplicados a ondas no polarizadas. Los componentes del vector de Jones, describen las amplitudes y las fases del campo eléctrico en las direcciones x e y ,

perpendiculares a la dirección de propagación de la onda electromagnética.

El método matricial es muy conveniente para el análisis a desarrollar ya que la matriz de transferencia del circuito óptico de dos puertos, es resultado del producto de las matrices de transferencia de los componentes individuales en el sistema, como se verá más adelante.

Cada una de estas matrices, debido a que se consideran células de cristal líquido sin pérdidas, son unitarias, además de que mediante una factorización se fuerzan a ser unimodulares, es decir, que tiene un determinante igual a 1.

Una matriz 2x2 expresada de la siguiente manera:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Es unitaria y unimodular si sus elementos cumplen las siguientes relaciones:

$$m_{22} = m_{11}^* \quad (2)$$

$$m_{21} = -m_{12}^* \quad (3)$$

$$m_{11}m_{11}^* + m_{21}m_{21}^* = 1 \quad (4)$$

$$m_{12}m_{12}^* + m_{22}m_{22}^* = 1 \quad (5)$$

$$m_{11}m_{12}^* + m_{12}m_{11}^* = 0 \quad (6)$$

$$m_{21}m_{22}^* + m_{22}m_{21}^* = 0 \quad (7)$$

Como vemos de (1) – (7), conociendo uno de los elementos de la matriz conocemos todos los demás, y la suma de los elementos al cuadrado de cada fila o cada columna es igual a 1.

El circuito óptico a analizar tiene una estructura en celosía [13] - [14], con N etapas tipo FIR, con dos entradas y dos salidas, resultado de la interconexión de varias etapas. Los filtros con estructura en celosía se utilizan ampliamente en el procesado digital de voz y en la implementación de filtros adaptativos. La forma de celosía utilizada, se describirá en el documento mediante ecuaciones y formulaciones presentes en el análisis.

Para el análisis de este estudio se utilizaron células de cristal líquido como láminas retardadoras de luz.

4. Polarización de la luz

Una onda plana electromagnética armónica, polarizada linealmente, es una onda transversal compuesta por un campo eléctrico y un campo

magnético simultáneos oscilando perpendicularmente entre sí; con el producto cruz de los vectores $E \times B$ apuntando en la dirección de propagación de la misma, tal y como se muestra en la Figura 1.

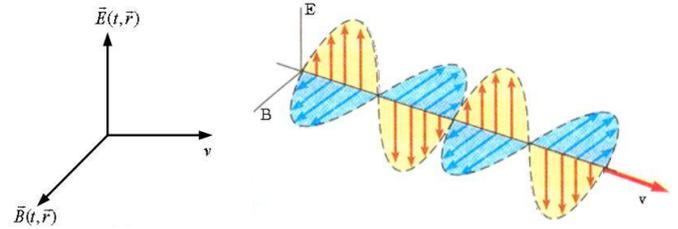


Figura 1. Polarización de la onda electromagnética senoidal, viajando a velocidad v , con polarización lineal (campo eléctrico y campo magnético perpendiculares a la dirección de propagación).

Las ecuaciones que gobiernan la onda plana en el vacío, moviéndose en la dirección de x están dadas por las leyes de Maxwell como sigue:

$$\vec{E}_y = A \cos(\omega t - kx) \quad (8)$$

$$\vec{B}_x = -\frac{A}{c} \cos(\omega t - kx) \quad (9)$$

Donde A es la amplitud del campo eléctrico inicial de la onda, ω es la frecuencia angular temporal, k es el número de onda angular o frecuencia angular espacial.

Para (8) y (9) la frecuencia angular ω (radianes por segundo) está relacionada con el periodo T (segundos) y la frecuencia f (ciclos por segundo o Hertz) a través de la ecuación:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (10)$$

Si la oscilación del campo eléctrico se da siempre sobre un plano que incluye la dirección de propagación, ver figura 1, decimos que la onda está polarizada linealmente. Si el vector campo eléctrico forma círculos a medida que la onda avanza en su dirección de propagación se dice que tenemos polarización circular. Y finalmente si este forma elipses en su avance, se dice que tiene polarización elíptica.

En la figura 2, se aprecia los tres tipos de polarización mencionados, con una descripción de las componentes del campo eléctrico y la forma geométrica que dibujan sus vectores campo eléctrico resultante

sobre un plano perpendicular a la dirección de propagación.

Como vemos de figura 2, en la polarización circular dos componentes perpendiculares de la misma amplitud están desplazadas 90 o -90 grados. En la elíptica, las amplitudes de cada componente son diferentes y están desfasadas 90 grados (o las amplitudes son iguales y su desfase diferente a 0, 90 o 180 grados). Mientras que en la lineal las amplitudes de cada componente del campo eléctrico están en fase o contrafase (180 grados). En este caso no importa el valor de las amplitudes de las componentes, pudiendo incluso ser cero una de ellas, como es el caso de la figura 2.

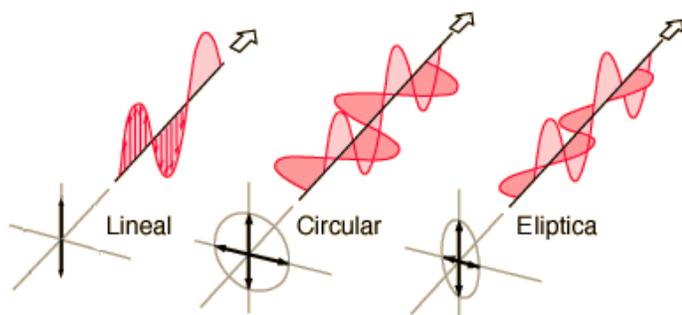


Figura 2. Campos eléctricos de luz polarizada linealmente, circularmente y de manera elíptica.

Los estados de polarización de un haz de luz pueden ser variados, de modo que se puede pasar de un haz con polarización lineal a uno con polarización circular y viceversa, o hacia uno elíptico y viceversa. Esto se logra a través de provocar retrasos en las componentes de luz ortogonales, de modo que retrasando una de las componentes con respecto a la otra, una cantidad que haga que las mismas se encuentren en fase (o contrafase), se logra una polarización lineal. Luego, se escogen ejes ortogonales a 45 grados con el eje de polarización lineal de la onda logrado, y posteriormente se retrasa una de las componentes 90 o -90 grados, para obtener una luz polarizada circularmente, o un ángulo diferente para lograr una polarización elíptica.

El retraso de las componentes de un haz de luz polarizado, se consigue variando la velocidad de propagación de cada una de sus componentes. Esto implica que diferentes polarizaciones vean diferentes índices de refracción. Esta propiedad se llama birrefringencia o doble refracción, y los materiales que

la tienen se denominan materiales birrefringentes. La calcita (carbonato de calcio) o esparto de Islandia, material con el que trabajó Huygens cuando descubrió la polarización, es uno de estos.

El fenómeno de birrefringencia sólo puede ocurrir si la estructura del material es anisótropa. Si el material tiene un solo eje de anisotropía, (es decir, es uniaxial), puede describirse asignando dos índices de refracción diferentes al material para las distintas polarizaciones.

Los cristales uniaxiales, pertenecen a los sistemas de cristales hexagonales, tetragonales y trigonales, y en los mismos existe una dirección tal que cualquier luz propagándose en esta dirección en el cristal tiene la misma velocidad, independientemente de su estado de polarización. Esta dirección se llama eje óptico, y el índice de refracción que ve la luz en esta dirección se llama índice de refracción ordinario. Por el contrario el índice de refracción que ve un rayo de luz propagándose perpendicularmente al eje óptico y con polarización lineal a lo largo del mismo se llama índice de refracción extraordinario.

La birrefringencia, también puede aparecer en materiales biológicos, e indica una ordenación de las moléculas, por ejemplo orientados entre sí, como sucede en un cristal. Este mismo fenómeno se observa también en los cristales líquidos.

5. Cristales líquidos

Los cristales líquidos son sustancias que tienen características de los sólidos y los líquidos. En un líquido, todas sus moléculas pululan de forma desordenada y sin una posición fija. Por otra parte, en un sólido las moléculas se encuentran pegadas unas a otras de forma rígida, siguiendo algún patrón en el que se encuentran ordenadas. En un cristal líquido, el término cristal se refiere a materiales que tienen esa clase de estructura ordenada, pero como su segundo nombre indica (líquido) la posición de estas moléculas no es precisamente muy ordenada. Lo que lo hace diferente a un líquido ordinario, es la forma alargada y delgada de sus moléculas. Aunque la posición de las moléculas sea aleatoria, su orientación puede ser alineada unas con otras en un patrón. Eso es lo que crea la estructura ordenada, como en los sólidos, de un cristal líquido. De este modo, la estructura de los cristales líquidos viene descrita fundamentalmente por dos parámetros: el orden posicional y el orientacional.

El orden orientacional se caracteriza por el parámetro S , que vale 1 para los sólidos, 0 para los líquidos y en los cristales líquidos suele encontrarse entre 0.3 - 0.6. La dirección en la que se alinean las moléculas de cristal líquido se llama director. Por otro lado, el orden posicional se da en materiales en los que los centros de masa de las moléculas pasan más tiempo en unas capas que en otras. Habrá oscilaciones en la densidad de centros de masa a lo largo del eje que cojamos como referencia. En este caso, el parámetro de orden (Ψ) medirá la amplitud de estas oscilaciones.

Los cristales líquidos son un tipo de material dieléctrico que debido a su orden orientacional poseen características ópticas y eléctricas anisótropas. La anisotropía eléctrica se refiere a que la velocidad de propagación de la luz varía según dirección y la polarización en que es examinada. Y la eléctrica se refiere a que en presencia de un campo eléctrico, modifican su orientación molecular de manera que el director tiende a alinearse con el campo eléctrico. Esta anisotropía eléctrica altera el efecto del cristal sobre la luz polarizada, lo que se utiliza en aplicaciones como, interrupción, conmutación, cambio de polarización, etc., de haces de luz, controladas eléctricamente.

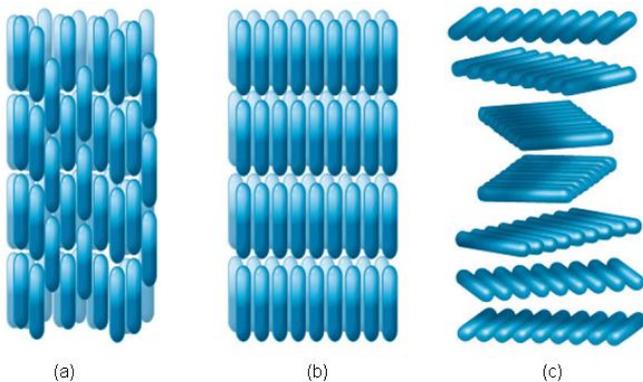


Figura 3. (a) Cristales líquidos de tipo nemáticos; (b) Cristales líquidos de tipo esmécticos; (c) Cristales líquidos de tipo colestéricos.

Al igual que en otros materiales, en los cristales líquidos también podremos encontrar diferentes estructuras (fases) para un mismo material. La diferencia entre unas y otras residirá en el tipo y extensión de orden presente. Según como se ordenen

dichas moléculas, se pueden clasificar tres tipos de cristales líquidos:

Cristales líquidos del tipo nemáticos; sus moléculas tienden a ser paralelas, pero sus posiciones son aleatorias.

Cristales líquidos de tipo esmécticos; sus moléculas son paralelas, sin embargo, sus centros se apilan en capas paralelas dentro de las cuales mantienen posiciones aleatorias. Al final mantienen un orden posicional en una sola dimensión.

Cristales líquidos de tipo colestéricos; estos son una forma distorsionada de los nemáticos. Aquí su orientación se somete a una rotación helicoidal alrededor de un eje.

En la figura 3 se aprecian los posicionamientos y orientaciones de los cristales líquidos mencionados.

En este trabajo, el circuito que se analiza utiliza células de cristal líquido del tipo nemático como retardadores. La célula utilizada consiste en una capa delgada de cristal líquido colocada entre dos placas de vidrio paralelas, con alineación homogénea. La alineación homogénea se refiere a que el director del cristal líquido es paralelo a las placas de vidrio paralelas que lo emparedan, en contraposición con la alineación homeotrópica, en donde el director es perpendicular a las placas paralelas. En la figura 4 se aprecian los dos tipos de alineaciones.

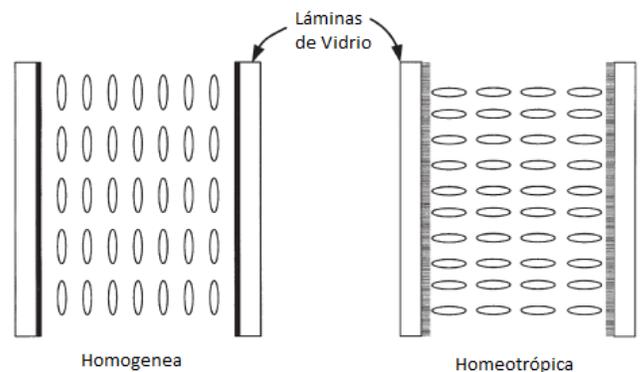


Figura 4. Alineaciones homogénea y homeotrópica, en celdas de cristal líquido.

Con la alineación homogénea, se aprovecha la anisotropía óptica de las moléculas de cristal líquido, de modo que dependiendo de la polarización de la luz esta vea un índice de refracción diferente. La orientación de las moléculas en una dirección preferente, en referencia a las placas de vidrio, se logra al crear surcos en los

mismos del orden del ancho de las células de cristal líquido.

Estas células actúan entonces como cristales uniaxiales con el eje óptico paralelo a la orientación molecular, es decir al director. Por ejemplo, para una célula de cristal líquido como la mostrada en la figura 5, las ondas de luz polarizadas que viajan en la dirección z (dirección perpendicular a las placas de vidrio), con componentes de campo eléctrico polarizadas en las direcciones x e y , (paralelo y perpendicular al director), verán dos índices de refracción diferentes, los índices de refracción extraordinario y ordinario del cristal líquido, denotados respectivamente por n_e y n_o .

Normalmente $n_e > n_o$, por lo que el eje del director (que ve el índice n_e) se llama eje lento y el perpendicular a este (que ve el índice n_o) se llama eje rápido.

Debido a esta anisotropía se puede decir que la resultante del campo eléctrico, en cada posición z de la célula (suma vectorial de las componentes), irá cambiando su estado de polarización. De este modo, si las componentes del campo eléctrico con polarizaciones en los ejes x e y , vienen dadas por:

$$\vec{E}_x = A \text{sen}(\omega t - k_x z) \mathbf{i} \quad (11)$$

$$\vec{E}_y = A \text{sen}(\omega t - k_y z) \mathbf{j} \quad (12)$$

Donde k_x y k_y vienen dados por $k_x = 2\pi n_e / \lambda_0$ y $k_y = 2\pi n_o / \lambda_0$, y son los números de onda angulares de las componentes.

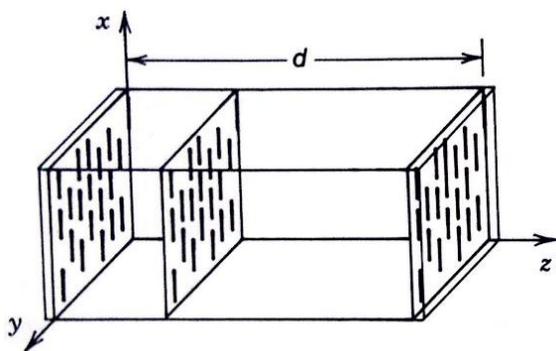


Figura 5. Orientación molecular del cristal líquido en ausencia de un campo eléctrico. El eje óptico se encuentra a lo largo de la dirección de las moléculas.

Al entrar al cristal, en $z=0$, la resultante de la suma vectorial de las componentes tiene una polarización lineal, con un ángulo de 45 grados (medidos desde el eje x), y amplitud de $A\sqrt{2}$.

Saliendo del cristal, en $z=d$, las componentes vendrán dadas por:

$$\vec{E}_x = A \text{sen}(\omega t - k_x d) \mathbf{i} \quad (13)$$

$$\vec{E}_y = A \text{sen}(\omega t - k_y d) \mathbf{j} \quad (14)$$

En donde el desfase ϕ entre ambas componentes vendrá dado por:

$$\phi = (k_x - k_y) d = \frac{2\pi d}{\lambda_0} (n_e - n_o) \quad (15)$$

Lo que puede resultar, en una onda polarizada de manera lineal, o circular, o elíptica, dependiendo del valor de ϕ , en cualquier caso, esto lo especificará el valor de d . Por lo que una célula de este tipo puede ser utilizada como un cambiador de polarización.

Finalmente se encuentra que al final del recorrido, una célula de espesor d (ver figura 5) proporcionará un retardo [15] entre las componentes con polarización horizontal y vertical de la onda dado por:

$$\Delta\tau = \frac{d}{c} (n_e - n_o) \quad (16)$$

En este trabajo las células de cristal líquido que se proponen son del tipo nemático.

6. Circuito, análisis y síntesis

La configuración del circuito óptico utilizado se muestra en la Figura 6. Este circuito consta de dos puertos de entrada (E_x e E_y) y dos puertos de salida (E_{sx} e E_{sy}). Y forma una estructura en celosía (o enrejado) con n etapas conectadas en cascada, siendo cada una de las etapas una célula de cristal líquido, excepto la última que es un analizador. Debido a esto, una de las componentes de salida (E_{sy}) será cero. El espesor de cada célula de cristal es igual, generando un retraso de tiempo entre cada uno de los estados de polarización lineales ortogonales de $\Delta\tau$, cuyo valor se da en (16). Este tiempo de retardo, está relacionado a la periodicidad del espectro en frecuencia de este circuito a través de la siguiente relación:

$$\Delta\tau = \frac{1}{f_0} \quad (17)$$

Donde f_0 denota la periodicidad del espectro de frecuencias.

Las células de cristal líquido se colocan de manera que el eje rápido del cristal dentro de la primera célula forma un ángulo θ_0 con respecto al eje x. El eje rápido del cristal dentro de la segunda célula se coloca con un ángulo θ_1 con respecto al eje rápido del cristal de la célula anterior, es decir, con respecto a θ_1 , y así sucesivamente.

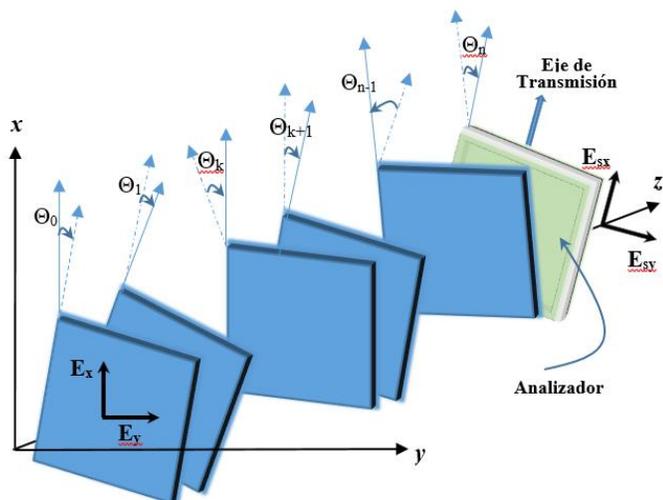


Figura 6. Alineación de Cristales Líquidos.

Dicha alineación del circuito estudiado se puede apreciar en la Figura 6. Igualmente, en la figura 6, se ve que a medida que hace su recorrido la luz, el ángulo θ_{k+1} irá variando en base al θ_k y esto será así sucesivamente hasta llegar al ángulo θ_n en el analizador, cuyo ángulo θ_n indicará la dirección del eje de transmisión del mismo.

Cabe destacar que en este estudio no se ha tomado en cuenta la dispersión de la birrefringencia de las moléculas de cristal líquido. Para un estudio sobre el tema puede consultar [16].

Cada etapa de cristal líquido se puede dividir en dos partes, que se pueden representar mediante matrices de transferencia ópticas. De modo que para la etapa k -ésima las entradas serán las componentes del campo eléctrico en las direcciones del eje rápido y lento de la célula de la etapa $k-1$, y sus salidas las componentes del campo eléctrico en las direcciones de los ejes rápido y lento de la célula de la etapa k .

La primera de las matrices representa el retardo temporal $\Delta\tau$, entre estados de polarización debido a la

diferencia entre los índices de refracción n_o y n_e . Esta matriz de transferencia óptica se expresa como:

$$[S_r] = z^{-1/2} \begin{bmatrix} z^{1/2} & 0 \\ 0 & z^{-1/2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

En este caso se han utilizado las técnicas de la transformada Z para expresar este retardo, siendo el retardo unitario utilizado igual a $\Delta\tau$. La constante $z^{-1/2}$, solo introduce un retardo constante a todas las frecuencias, y puede ser despreciada.

La segunda matriz calcula la amplitud de las componentes del campo eléctrico en las direcciones del eje rápido y lento de la misma. Esta matriz de transferencia, se denomina como matriz de rotación, y se expresa como:

$$[S_\theta] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta \\ -\text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (19)$$

En donde θ es el ángulo formado entre el eje rápido la etapa analizada con respecto al eje rápido de la etapa anterior.

La matriz de transferencia de la k -ésima etapa en particular puede ser encontrada a partir de la multiplicación de (18) con (19), lo cual resulta en:

$$[S_k] = \begin{bmatrix} \cos \theta_k z^{1/2} & \text{sen } \theta_k z^{1/2} \\ -\text{sen } \theta_k z^{-1/2} & \cos \theta_k z^{-1/2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

En donde, se ha despreciado el término $z^{-1/2}$. Esta matriz, es una forma especial de la matriz de Jones, ya que esta podría ser encontrada reemplazando z por $e^{j\omega\Delta\tau}$.

Finalmente, para describir la etapa del analizador se necesitarán dos matrices, la matriz de rotación dada en (19), y un matriz del analizador dada por:

$$[S_a] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

La matriz de transferencia total puede ser expresada como el producto:

$$[S] = [S_a][S_T] \quad (22)$$

Donde $[S_T]$ puede ser expresada como un producto de múltiples matrices de transferencia básicas dadas (20), y una matriz de rotación del analizador dada en (19). Con esta representación $[S_T]$ viene dada por:

$$[S_T] = [S_\theta][S_{n-1}] \cdots [S_1][S_0] = \prod_{k=n}^0 [S_k] \quad (23)$$

El resultado será una matriz 2 x 2, donde los elementos de la misma serán polinomios en z, de grado n. Estos polinomios cumplen la relación de los elementos de una matriz unitaria [13]. De modo que con tener uno de ellos podemos encontrar el valor de los demás utilizando las relaciones de (2) a (7).

Los polinomios causales encontrados tendrán la siguiente forma:

$$H(z) = \left(\sum_{k=0}^n a_k z^{-k} \right) z^{\frac{n}{2}} \quad (23)$$

$$F(z) = \left(\sum_{k=0}^n b_k z^{-k} \right) z^{\frac{n}{2}} \quad (24)$$

Siendo a_k y b_k los coeficientes de polinomios en z, ambos de grado n.

Como vemos de (18 - 24) hay una relación entre la función de transferencia en z generada y los ángulos de los ejes ópticos de los cristales líquidos θ_k . Nótese que los coeficientes a_k y b_k de los polinomios son funciones de los θ_k . Esto indica que podemos sintetizar filtros ópticos con esta arquitectura, colocando adecuadamente los θ_k de cada una de las etapas del circuito en celosía, de modo que para sintetizar una función de transferencia de grado n (de n+1 coeficientes), necesitaríamos n etapas de cristal líquido y una etapa de analizador, resultando en un total de n+1 θ_k , con $k = 0, 1, \dots, n$. Donde cada θ_k con $k = 0, 1, \dots, n-1$, representa el ángulo relativo del eje rápido de cada etapa de cristal respecto a la anterior, y θ_n representa el ángulo del eje de transmisión del analizador respecto al eje rápido de la etapa anterior.

En este punto debemos mencionar que no se pueden sintetizar las funciones de transferencia H(z) y F(z) independientemente, ya que al ser la matriz total resultante unitaria, los mismos son complementarios en potencia, por lo que una vez que se especifica una, en nuestro caso F(z), la otra que inmediatamente determinada.

Para obtener el valor de los n+1 θ_k que sintetizan correctamente los filtros con coeficientes a_k y b_k deseados, se utiliza el método de síntesis de filtros birrefringentes basado en el diseño de filtros digitales descrito en [17][17].

7. Ejemplo de aplicación

Una aplicación novedosa de este circuito óptico utilizando este método de síntesis, puede ser la equalización del espectro de ganancia de un

amplificador óptico de fibra dopada con Erbio. Este amplificador es utilizado con frecuencia en enlaces de fibra óptica para compensar la atenuación introducida por la fibra y otros elementos en la señal transmitida. En la figura 7, se aprecia una medición del espectro de emisión estimulada de este tipo de amplificadores.

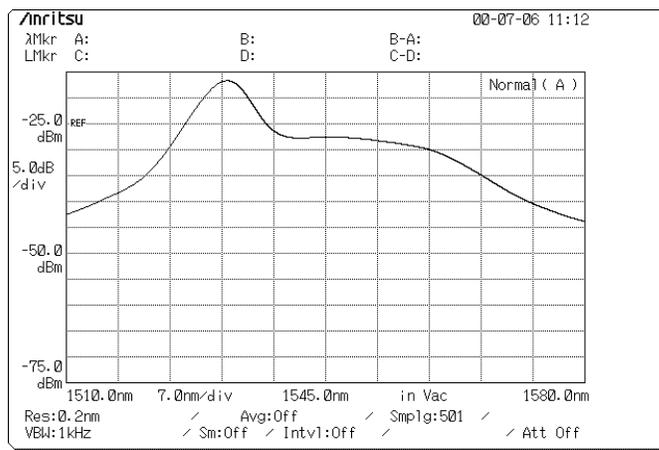


Figura 7. Espectro de emisión espontánea de un amplificador de fibra dopada con Erbio.

Como se puede apreciar en la figura 7, la ganancia que el mismo presenta para el rango de longitudes de onda de 1510 nm a 1580 nm no es uniforme. Por lo tanto canales multiplexados en longitud de onda dentro de esta banda serán amplificados de distinta manera.

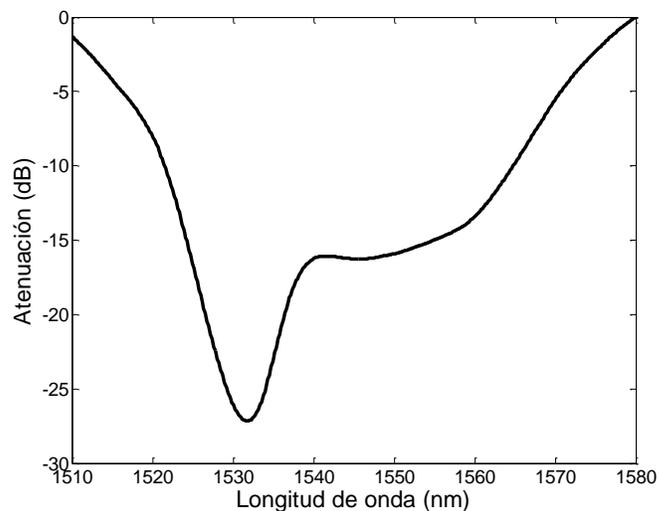


Figura 8. Espectro en longitudes de onda del equalizador a implementar.

Para evitar esto un filtrado es necesario, este filtrado se puede lograr con un equalizador óptico de ganancia

implementado con un circuito óptico como el tratado en este artículo.

El ecualizador estaría pensado para que funcione desde 1510 nm a 1580 nm. El espectro en longitudes de onda del ecualizador que se debe implementar se muestra en la figura 8.

Para implementar el mismo se debe obtener la función de transferencia en Z que sintetice este espectro.

Para obtener esta función de transferencia, se utilizarán las técnicas de diseño de filtros FIR de fase lineal en el dominio digital a partir de la respuesta espectral deseada. Para esto, primero se debe representar el espectro en frecuencia deseado, muestrearlo y luego utilizando un algoritmo de mínimos cuadrados, encontrar los coeficientes de la función de transferencia que generan un filtro de fase lineal que minimiza el error cuadrático entre la función de transferencia y las muestras. La función sintetizada se fija para que tenga un orden de 20 (21 coeficientes), de modo que genere un espectro apropiado. Órdenes ligeramente mayores que este, no mejoran los resultados de manera apreciable, por eso se escoge este valor.

El espectro en frecuencia deseado y el sintetizado por la función de transferencia encontrada se muestran en la figura 9.

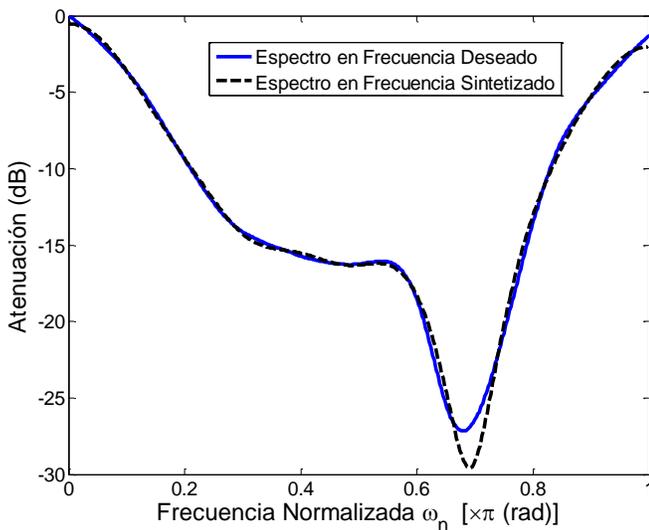


Figura 9. Espectros en frecuencia deseados y sintetizados.

Como se observa la diferencia entre el espectro deseado y el sintetizado es muy pequeña. Solo en torno a la máxima atenuación del ecualizador la diferencia alcanza un valor apreciable de 2.4 dB.

Los coeficientes b_k de la función de transferencia $F(z)$ y los a_k de su función de transferencia complementaria en potencia $H(z)$ se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes b_k y a_k de las funciones $F(z)$ y $H(z)$ respectivamente

k	a_k	b_k	k	a_k	b_k
0	0.87427	0.00662	11	-0.00195	0.03853
1	-0.06994	-0.00164	12	-0.00417	0.15605
2	-0.19000	0.00557	13	-0.00005	-0.00836
3	-0.03344	0.00844	14	-0.00164	0.08410
4	-0.11522	0.01586	15	-0.00010	0.00016
5	-0.01684	0.00016	16	-0.00028	0.01586
6	-0.05419	0.08410	17	-0.00011	0.00844
7	-0.00964	-0.00836	18	-0.00010	0.00557
8	-0.02439	0.15605	19	0.00002	-0.00164
9	-0.00409	0.03853	20	-0.00005	0.00662
10	-0.01105	0.33077			

El $\Delta\tau$ necesario para implementar esta función, viene dado por la ecuación (16). La periodicidad debe ser como mínimo del doble del ancho de banda de interés, en unidades de frecuencia, es decir, $2 \cdot c \cdot (1/1530\text{nm} - 1/1565\text{ nm}) = 17.6\text{ THz}$, lo que me genera un $\Delta\tau = 0.0568\text{ ps}$. Utilizando una mezcla de cristal líquido nemático W1865 de alta birrefringencia [18], con aproximadamente $n_e - n_o = 0.41$ a $\lambda = 1.5\text{ }\mu\text{m}$, y despejando para d en la ecuación (16), obtenemos que necesitamos celdas de cristal líquido de $41\text{ }\mu\text{m}$ de espesor. Si hay problemas de homogeneidad en las células de cristal líquido, este espesor se podría reducir más si se incrementa el ancho de banda a ecualizar, ó se consigue una mezcla de cristal líquido más birrefringente, ó se colocan dos células de cristal líquido de la mitad del espesor calculado con la misma orientación angular por etapa.

Como vemos se necesitarán 20 retardadores de cristal líquido y 1 polarizador lineal, cada uno con un ángulo relativo θ_k entre etapas sucesivas. El ángulo absoluto de cada una de las etapas lo llamaremos φ_k , y

se mide respecto al eje x (eje rápido del primer cristal), el mismo es igual a la sumatoria de todos los ángulos θ_k de las etapas anteriores incluyendo la etapa k -ésima.

Aplicando el algoritmo reportado en [17], se encuentran los ángulos θ_k y φ_k necesarios, los cuales se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Ángulo θ_k y φ_k para cada una de las etapas

k	θ_k (rad)	φ_k (rad)	k	θ_k (rad)	φ_k (rad)
0	1.56322	1.56322	11	-0.06256	0.69854
1	0.00127	1.56449	12	-0.19970	0.49884
2	-0.00792	1.55657	13	-0.00184	0.49700
3	-0.01031	1.54626	14	-0.10269	0.39431
4	-0.02163	1.52463	15	-0.00443	0.38988
5	-0.00443	1.52020	16	-0.02163	0.36825
6	-0.10269	1.41751	17	-0.01031	0.35794
7	-0.00184	1.41567	18	-0.00792	0.35002
8	-0.19970	1.21597	19	0.00127	0.35129
9	-0.06256	1.15341	20	1.56322	1.91451
10	-0.39231	0.76110			

8. Conclusiones

En este documento se presenta el análisis de un novedoso circuito óptico birrefringente con células de cristal líquido nemático y alineación homogénea, utilizados como retardadores, además de un polarizador. Primero presenta un repaso de la luz como onda electromagnética, de la polarización de la luz, de las matrices de transferencia ópticas y del funcionamiento de las células de cristal líquido como retardadores, conocimientos necesarios para entender el análisis y las ecuaciones desarrolladas para el circuito. El circuito analizado se puede representar como una red de dos puertos óptica, de dos entradas y dos salidas con respuesta finita al impulso (FIR) y con una configuración en celosía. Para el análisis del mismo se utiliza el formalismo de las matrices de transferencia ópticas en el dominio de la transformada Z . Mediante este análisis, se muestra como este circuito genera funciones de transferencia de orden igual al número de etapas de cristal líquido utilizadas. Estando los coeficientes de los mismos relacionados con los ángulos relativos, de los ejes rápido y lento de las células de cristal líquido, entre etapas sucesivas.

Se expone un ejemplo de aplicación novedoso de este circuito óptico, que utilizando el método de síntesis de filtros ópticos birrefringentes reportado anteriormente, para sintetizar un ecualizador de ganancia de un amplificador de fibra dopada con Erblio, que cubre la ventana C y parte de las ventanas L y S de comunicaciones ópticas. La función sintetizada solo se desvía apreciablemente de la función deseada en una estrecha banda de frecuencias, con una diferencia aproximada de 2.4 dB.

9. Agradecimiento

Agradecemos a la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (Senacyt) por una beca otorgada a uno de los autores.

10. Referencias

- [1] S. Vargas y C. Vazquez, "Optical reconfigurable demultiplexer based on Bragg grating assisted ring resonators," *Optics Express*, vol. 22, no 16, p. 19156-19168, 2014.
- [2] C. Vazquez, S. E. Vargas, J. M. S. Pena y A. B. Gonzalo, "Demultiplexers for ultranarrow channel spacing based on Mach-Zehnders and ring resonators. *Optical Engineering*," vol. 43, no. 9, p. 2080-2086, 2004.
- [3] A. Rohit, J. Bolk, X. J. Leijtens, y K. Williams, "Monolithic Nanosecond-Reconfigurable 4 4 Space and Wavelength Selective Cross-Connect," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 17, p. 2913-2921, 2012.
- [4] A. Eghbali, H. Johansson, O. Gustafsson, y S. J. Savory, "Optimal least-squares FIR digital filters for compensation of chromatic dispersion in digital coherent optical receivers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32 no. 8, p. 1449-1456, 2014.
- [5] S. Alboon y R. Lindquist, "Flat-top/distortionless tunable filters based on liquid crystal multi cavities for DWDM applications," en *Southeastcon, 2008. IEEE. IEEE*, p. 117-122, 2008.
- [6] C. K. Madsen, "Optical Filter Synthesis," in *Encyclopedic Handbook of Integrated Optics*, Edited by K. Iga and Y. Kokubun, Marcel-Dekker, 2005.
- [7] S. Vargas y C. Vazquez, "Synthesis of Optical Filters using Microring Resonators with ultra-large FSR," *Optics Express*, vol. 18, no. 25, p. 25936 – 25949, 2010.
- [8] G. Shabtay, E. Eidingler, Z. Zalevsky, D. Mendlovic, y E. Marom, "Tunable birefringent filters-optimal iterative design," *Optics express*, vol. 10, no 26, p. 1534-1541, 2002.
- [9] B. Lyot, "Optical apparatus with wide field using interference of polarized light," *C.R. Acad. Sci. (Paris)*, vol. 197, p. 1593, 1933.
- [10] I. Solc, "Birefringent chain filters," *J. Opt. Soc. Am.* vol. 55, no. 6, pp. 621-625, 1965.

- [11] C. Chen, C. Pan, C. Hsieh, Y. Lin, y R. Pan, "Liquid-crystal-based terahertz tunable Lyot filter," *Applied Physics Letters*, vol. 88, no 10, p. 101107-101107-3, 2006.
- [12] E. Hecht, *Optics*, 4rd ed., Addison Wesley, 2002.
- [13] K. Jinguji y M. Kawachi, "Synthesis of Coherent Two-Port Lattice-Form Optical Delay-Line Circuit," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 8, p. 73-82, 1995.
- [14] J. Proakis y D. Manolakis, *Tratamiento Digital de Señales: Principios, algoritmos y aplicaciones*, 3ra ed., Prentice Hall España, 1998.
- [15] B. E. Saleh y M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 1st edition, John Wiley and Sons, 1991.
- [16] S. T. Wu, "Birefringence dispersions of liquid crystals," *Physical Review A*, vol. 33, no. 2, p. 1270-1274, 1986.
- [17] Rui Hong Chu, y Graham Town. "Birefringent filter synthesis by use of a digital filter design algorithm," *Applied optics* vol. 41, no. 17, p. 3412-3418, 2002.
- [18] Nowinowski-Kruszelnicki, E. Kędzierski, J. Raszewski, Z. Jaroszewicz, L. Dąbrowski, R. Kojdecki, M., ... and E. Miszczyk, "High birefringence liquid crystal mixtures for electro-optical devices," *Optica Applicata*, vol. 42, no. 1, p. 167-180, 2012.

Generación y análisis de indicadores del uso de las TIC en PyMEs Agroindustriales

Generation and analysis of indicators of ICT in SMEs Agroindustries

Lilia Muñoz ¹, Piscis Pitti¹

¹Grupo de Investigación en Tecnologías Computacionales Emergentes, Universidad Tecnológica de Panamá
lilia.munoz@utp.ac.pa, piscis.pitti@utp.ac.pa

Resumen— En la actualidad, las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en las PyMEs (Pequeñas y Medianas Empresas), son un elemento esencial en la integración de las actividades básicas de operación, ya que la actividad económica de estas empresas requiere de sistemas que les permitan permanecer en el mercado, ser competitivas y más productivas. En este trabajo, a partir de una muestra de 150 empresas agroindustriales de la provincia de Chiriquí, República de Panamá, se evaluó la adquisición y el uso de las TIC. Para ello, se ha desarrollado un conjunto de indicadores que han permitido entender la situación actual de estas empresas. Los resultados muestran una falta de conocimiento acerca de los beneficios que permiten el uso de las TIC en el trabajo diario y que se puede mejorar con estas, que podrían ser una ventaja competitiva, mejorar sus procesos, la productividad y por lo tanto sus ingresos.

Palabras claves— Agroindustrias, Indicador, PyMEs, TIC.

Abstract— Currently, the use of Information Technology and Communication (ICT) in SMEs (Small and Medium Enterprises), are an essential element in the integration of basic operating activities, since their economic activity requires systems that allow them to stay in the market, go ahead and, of course, that generate returns in line with expectations of organizations. In this paper, from a sample of 150 agrobusinesses Chiriquí, Panama, the acquisition and use of ICT is analyzed. They have developed a set of indicators to understand the current situation of these companies. The results exhibit a lack of knowledge about the benefits that allow the use of ICT in the daily work and which can be improved with these, which could be a competitive advantage, improve their processes and productivity and thus their income.

Keywords— Agroindustries, ICT, Indicator, SMEs

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 26 de agosto de 2016

Fecha de Aceptación: 11 de octubre de 2016

1. Introducción

Las Pequeñas y Medianas Empresas (PyMEs) desempeñan un importante papel en la economía de los países en desarrollo, contribuyen de forma importante a la creación de nuevos puestos de trabajo, a la recuperación económica de ciertas regiones y también al progreso tecnológico. Su competitividad depende, fundamentalmente, de la capacidad del gerente o propietario/a, de la inversión en intangibles (conocimiento) y en equipos tecnológicos, y de su capacidad de innovación [1].

Uno de los más importantes desarrollos tecnológicos de los últimos años ha sido el de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC). Los beneficios potenciales de estas tecnologías para una organización incluyen desde los beneficios de carácter operativo, como el aumento de la eficiencia (por ejemplo, automatización de procedimientos rutinarios), hasta los beneficios de carácter estratégico, como la mejora de los procesos empresariales (por ejemplo, estableciendo alianzas estratégicas con otras empresas) [2,3].

Durante la última década, las TIC tienen una fuerte presencia en casi todas las áreas del saber. El impacto de esta tecnología se detecta en una infinidad de actos cotidianos que van desde la compra de boletos aéreos a la interacción con el sector público (para obtener un certificado, participar en las compras públicas, que representan una cuota importante del Producto Interno Bruto (PIB), pagar impuestos), de la información médica al juego y a la comunicación entre personas: en fin el *modus operandi* de la sociedad moderna y de sus instituciones públicas y privadas se ve profundamente modificado. El desafío consiste en que necesariamente estas empresas tendrán que adoptar e incorporar de manera estratégica esta tecnología a su organización [4].

En los últimos años, ha habido varias iniciativas para mejorar la medición de TIC en las empresas de la región, aunque esta se concentra en datos básicos y la construcción de nuevos indicadores es incipiente. Los datos disponibles en los países de la región básicamente son: la disponibilidad de computadoras, la conexión a *Intranet* e *Internet*, las ventas y compras a través de *Internet* y la dotación de recursos humanos que emplean estas tecnologías, incluyendo en algunos casos información sobre el tipo de conexión a *Internet*, el uso que se hace de esta y la disponibilidad de *extranet*, sin detallar las dotaciones de equipos o su utilización. En varios casos, la información se refiere únicamente al sector manufacturero, sin abarcar el conjunto de los sectores productivos, y en otros no se incluyen datos sobre las microempresas o estos tienen problemas de representatividad.

Actualmente, Panamá aparece en el lugar 51 de 143 países en el índice de Conectividad (*Network Readiness Index*) del Reporte Global de Tecnologías de Información 2015, publicado por el Foro Mundial Económico. En comparación con Chile que se encuentra en la posición 38 y Costa Rica en la 49 [5]. Lo cual es una ventaja competitiva para las empresas de nuestro país, ventaja que en muchas ocasiones no se sabe aprovechar por el desconocimiento o la falta de asesoría con respecto al uso de las TIC. Sin embargo, en comparación con el año 2014, Panamá descendió 8 posiciones, para ese año se encontraba en la posición 48, lo cual es preocupante, ya que el desarrollo tecnológico en la región no ha dejado de avanzar.

El uso de las TIC en las empresas provee muchas ventajas que ayudan al mejoramiento y evolución de las

mismas. En países desarrollados, contar con tecnología es primordial, no importa el tamaño de la empresa ni a lo que se dedica; en cambio, en países subdesarrollados o en vías de desarrollo, el uso de TIC en muchos casos no es parte del plan de trabajo de las empresas, principalmente en las PyMEs.

Por su parte, la transformación de alimentos es la principal actividad dentro del sector industrial de Panamá y una de las que más favorablemente ha discurrido en los últimos años. Las PyMEs agroindustriales en Panamá han logrado grandes avances, pero se desconoce el uso que este tipo de empresas le da a las TIC. No hay cifras con certeza sobre el uso que les dan a éstas, o tan siquiera, si cuentan con tecnología en sus empresas.

La información estadística sobre el uso de las TIC en las PyMEs agroindustriales de Panamá es casi nula, por lo que no se puede establecer un plan de desarrollo en el país para apoyar a estas empresas, ya que se desconoce el nivel de avance tecnológico que tienen. En este artículo se presentan los resultados de un estudio que permitió generar un conjunto de indicadores para determinar el uso y adquisición de las TIC en empresas agroindustriales de la provincia de Chiriquí, República de Panamá.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el trabajo relacionado con respecto al uso de las TIC en las PyMEs, en la sección 3 se describen aspectos relevantes de las TIC y las PyMEs, en la sección 4 los materiales y métodos empleados, mientras que en la sección 5 se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de indicadores. En la sección 6 se describen los resultados y finalmente en la sección 7 las conclusiones y trabajo futuro.

2. Trabajo relacionado

La literatura más relevante sobre el uso de las TIC en PyMEs comprende varias iniciativas, por ejemplo en [6], se desarrolló una metodología, para la implementación de procesos de gestión tecnológica en las PyMEs del sector agroindustrial del Departamento del Atlántico, Colombia. Para ello se realizó un estudio sobre la situación actual de la gestión tecnológica en estas empresas e identificar las principales variables que influyen en estos procesos. Por un lado, en Boyacá, Colombia se desarrolló un proyecto para estudiar la implementación de las TIC que hacen las PyMEs, este

estudio se desarrolló bajo una metodología cualitativa y cuantitativa aplicando un cuestionario compuesto por 74 indicadores, propuestos por la CEPAL y el OSILAC [7]. Además en [8] se presentó un estudio para determinar el dominio sobre el uso de las TIC en las MIPyME industriales mexicanas, para comprobar su posición competitiva en este aspecto. Para este fin se recolectaron datos a través de un trabajo de campo por sujetos voluntarios logrando entrevistar a 394 empresas. Los principales hallazgos permiten determinar que el grado de uso de TICs por parte de las MIPyMEs industriales en México es incipiente lo que estaría restándole competitividad para hacer frente a un mercado globalizado.

Por otro lado, en [9] se evidencia cómo las TIC representan un elemento esencial de la competitividad empresarial en la economía moderna, y que su impacto se extiende siempre desde las grandes empresas, que empezaron a utilizarla para mejorar su eficiencia y fortalecer su presencia en el mercado, hacia las pequeñas y medianas empresas. Se observa cómo en América Latina la mayoría de las empresas han adquirido conectividad de banda ancha y que el terreno está maduro para dar un paso más, es decir adoptar soluciones y servicios basados en TIC que tengan un impacto sistémico en las empresas y en sus cadenas de valor.

Se han hecho grandes esfuerzos por evaluar el uso de las TIC en las PyMEs. Sin embargo, en Panamá no existen estudios que desarrollan indicadores sobre el uso de las TIC en el sector agroindustrial. Es por ello, que presentamos un conjunto de indicadores sobre el uso de las TIC en el sector agroindustrial.

3. TIC y PyMEs

Durante la última década las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), en particular aquella soportada sobre la *Internet*, ha modificado de manera profunda la vida moderna. Gracias a ellas, las organizaciones han conseguido obtener importantes beneficios, entre los que caben mencionar la mejora de sus operaciones, llegada a una mayor cantidad de clientes, la optimización de sus recursos, la apertura a nuevos mercados, un conocimiento más profundo acerca de las necesidades de la clientela para brindarles un servicio de mejor calidad y una comunicación más fluida, no solo con sus empleados sino también con sus

clientes y proveedores [8]. En pocas palabras, las TIC les permiten lograr aumentar considerablemente la eficiencia de las PyMEs.

Lo que hace unos años se definía como el “tsunami” de las nuevas tecnologías (la informática, la *Internet* y las telecomunicaciones), ha afectado también al sector empresarial. La adopción de TIC en las empresas ha sucedido en etapas. Si bien con altas y bajas, en general las grandes empresas han mantenido las inversiones en sistemas de soporte a sus funciones empresariales desde hace varias décadas, por ejemplo el sistema de intercambio electrónico de datos (EDI – *Electronic Data Interchange*). En cierta medida las grandes empresas han señalado (y lo siguen haciendo) el camino a las empresas de menor tamaño. Con la simplificación y reducción de los costos de la tecnología, los servicios que antes estaban al alcance de las grandes empresas, poco a poco se han difundido a las PyMEs [10].

Actualmente, la adopción de las TIC es un proceso complejo que requiere no solamente inversión, sino también que la organización tenga la capacidad de realizar los cambios que exige el uso y la aplicación de las mismas, en las diferentes funciones empresariales. Por su parte, Winkler [11] expresa que, en los últimos 10 años se fue transformando el uso de las TIC; ahora no constituyen solamente un comodín o soporte, sino su uso forma parte de la estrategia de la organización, como un elemento que le proporciona una ventaja competitiva al ser utilizada en la gestión de sus procesos, contribuyendo a la toma de decisiones.

Las TIC representan una área de oportunidad para las PyME's. El desafío consiste en que necesariamente estas empresas tendrán que adoptar e incorporar de manera estratégica esta tecnología a su organización [3,4]. Dependerá de cada sector empresarial, evaluar los aspectos críticos y así elegir las herramientas tecnológicas adecuadas, verificar las barreras del uso de las TIC, y el impacto en los procesos de negocio [5]. Un diagnóstico claro y objetivo después de la evaluación de la situación actual de la empresa contribuirá a tomar las mejores decisiones.

Según [5], cada empresa debería considerar los siguientes aspectos para implementar las TIC:

- Infraestructura de las TIC: se debe evaluar y determinar lo que en verdad se necesita. Existen estándares que se deben tener presentes, para implementar tecnología de vanguardia, que contribuya a la empresa.

- *Software* funcional: no basta con tener programas o aplicaciones, sino que realmente se adapten a las necesidades que tiene la empresa.
- Capacitación del personal en el área de las TIC: puede ser una barrera, ya que el personal debe adaptarse a la tecnología. La implementación se logrará cuando el conocimiento y habilidades en el recurso humano estén disponibles.

4. Materiales y métodos

Para el desarrollo de este estudio se realizó una investigación empírica, utilizando para ello, el directorio de empresas del Ministerio de Comercio e Industrias de la provincia de Chiriquí, República de Panamá con una muestra original de 150 empresas agroindustriales, la cual se seleccionó por medio de un muestreo aleatorio con un error máximo de 4.8% y un nivel de confianza de 95%. De la misma manera se desarrolló una aplicación móvil que permitió captar la información y almacenarla en una base de datos para posteriormente analizarla y generar los indicadores. La aplicación móvil consistió en una encuesta que fue aplicada a gerentes de las PyMEs. En la tabla 1 se describe la ficha técnica de la investigación.

Tabla 1. Ficha técnica de la investigación.

Característica	Encuesta
Universo	500 empresas PyMEs
Ámbito de estudio	Provincia de Chiriquí
Unidad muestral	PyMEs de 5 a 150 empleados
Método para recolectar la información	Encuesta digital
Procedimiento de muestreo	Entrevista con cada una de las empresas
Tamaño de la muestra	150 empresas
Fecha del trabajo de campo	Septiembre 2015 a enero de 2016

Para especificar el comportamiento de la aplicación se desarrolló un Caso de Uso. Los Casos de Uso son una técnica para especificar el comportamiento de un sistema. Según Arjonilla [10]: “Un Caso de Uso es una secuencia de interacciones entre un sistema y alguien o algo que usa alguno de sus servicios”. Es una forma de expresar cómo alguien o algo externo a un sistema lo usa. Cuando se dice “alguien o algo” se hace referencia a que los sistemas son usados no sólo por personas, sino también por otros sistemas de *hardware* y *software*. En

la figura 1 se puede apreciar el diagrama de Casos de Uso, que se utilizó para el desarrollo de la aplicación PYMESTIC.

El Caso de Uso es iniciado por el actor. A partir de ese momento, ese actor, junto con otros actores, intercambia datos o control con el sistema, participando de ese Caso de Uso. En nuestro caso, el usuario realiza los siguientes pasos:

- Iniciar una encuesta: al iniciar una encuesta debe guardar los datos de la empresa para que aparezcan las preguntas, y así llenar la encuesta. Inmediatamente, debe guardar las respuestas.
- Consultando resultados: la otra acción que realiza es la de ver resultados, en la que elige una consulta de una lista predeterminada, y puede observar los resultados requeridos.

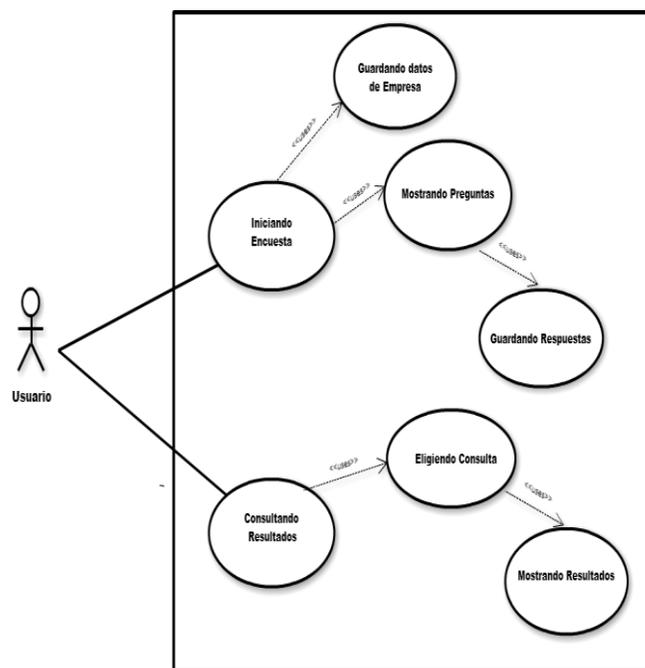


Figura 1. Diagrama de Caso de Uso de la aplicación PYMESTIC.

Para la creación de la base de datos se utilizó el modelo entidad – relación que fue construido en *MySQL Workbench*. La opción “*Forward Engineer*” fue la que se utilizó para este proceso. En la figura 2 se muestra el esquema de la base de datos, la cual fue desarrollada en *MySQL*. Por otro lado, en la figura 3 se puede visualizar una de las pantallas de la aplicación que se desarrolló como herramienta para capturar la

información, suministrada por los gerentes de las empresas. La aplicación muestra preguntas con una opción de seleccionar una o más respuestas, además guarda los datos de la empresa a encuestar y todas las

respuestas insertadas. Además, en la figura 4 se pueden observar algunos resultados de las encuestas.

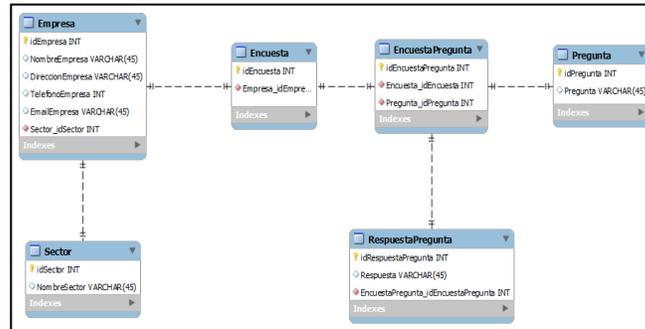


Figura 2. Esquema de la Base de Datos.

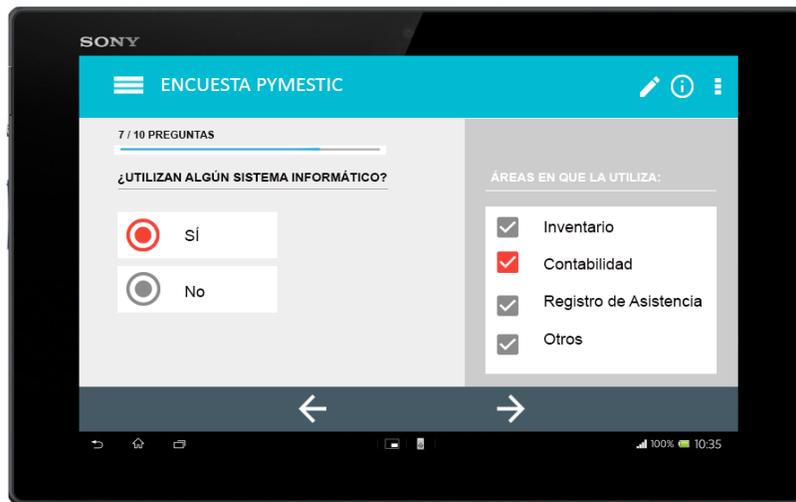


Figura 3. Pantalla de la aplicación con la encuesta.

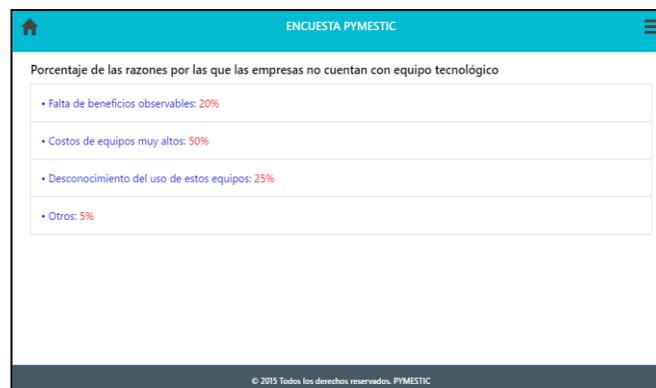


Figura 4. Pantalla de resultados.

5. Metodología para el desarrollo de indicadores

Un indicador es una expresión cualitativa o cuantitativa observable, que permite describir características, comportamientos o fenómenos de la realidad a través de la evolución de una variable o el establecimiento de una relación entre variables, la que comparada con períodos anteriores, productos similares o una meta o compromiso, permite evaluar el desempeño y su evolución en el tiempo. Por lo general, son fáciles de recopilar, altamente relacionados con otros datos y de los cuales se pueden sacar rápidamente conclusiones útiles y fidedignas [9]. Para el desarrollo de los indicadores se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

5.1 Formulación del problema

En Panamá existe un gran auge de las pequeñas y medianas empresas en el sector agroindustrial, específicamente en el interior del país. Estas empresas buscan ocupar un lugar importante en la economía, por lo que algunas optan por buscar ayuda en las tecnologías para ser más competitivas.

El problema radica en que actualmente no se cuenta con cifras estadísticas sobre el uso de las TIC en las PyMEs agroindustriales. Si estas empresas utilizan TIC para su desarrollo, se desea conocer cuáles las implementan en sus labores diarias, el conocimiento que tienen sobre sus beneficios y las proyecciones a futuro en la empresa respecto a estas tecnologías. En caso contrario, el estudio determinará las causas más comunes por las que estas PyMEs no las utilizan.

Con la creación de estos indicadores se busca medir el impacto de las TIC en las PyMEs agroindustriales. Los datos se recogerán a través de encuestas aplicadas a los directivos de cada empresa. Las preguntas de la encuesta fueron desarrolladas cuidadosamente para obtener datos claros y lo más preciso posible.

5.2 Definición de variables

Cada indicador está construido con base a una fórmula, la cual contiene diferentes variables, algunas se repiten en los indicadores.

A continuación en tabla 2 se definen algunas de las variables relacionadas con las TIC, explicando con detalle la información que se guardará en cada una; para así evitar discusiones o ambigüedades sobre los resultados.

Tabla 2. Variables relacionadas con las TIC

Variable	Definición
Empresas con Equipos Tecnológicos	Existen equipos de computación (computadora de escritorio, portátil o de mano, equipos con aptitudes informáticas incorporadas) en la empresa.
Empresas con Sistemas Informáticos	Uso de <i>software</i> para labores específicas en la empresa. No importa la forma en que se haya obtenido el mismo (<i>Outsourcing</i> , desarrollo en casa, compra de paquetes, entre otros).
Número de empleados que usan la computadora	Número de empleados que efectivamente usan computador para la realización de sus actividades dentro de la empresa. Empleados se refiere a todas las personas que trabajan para la empresa y no solo a aquellas que realizan un trabajo administrativo. Comprende a los propietarios y a los socios que trabajan, así como a los empleados.
Número de empresas con redes sociales	Número de empresas que cuentan con redes sociales a nombre de la empresa. No incluye las menciones en las cuentas de los dueños, administrativos o empleados de la empresa.
Empresas que realizan trámites bancarios por <i>Internet</i>	Número de empresas que utilizan la banca en línea de las entidades financieras donde tienen sus fondos, no detalla el tipo de trámite que realizan.
Empresas que adquieren equipos tecnológicos cuando los necesitan	Son las empresas que adquieren sus equipos de tecnología en el momento justo que surge la necesidad. No existe un presupuesto en la empresa para el área de tecnología.

Otro tipo de variables que se utilizan en el estudio son las variables de clasificación, son llamadas así porque clasifican la información dependiendo de algunos factores establecidos como zona geográfica, actividad económica y número de empleados.

5.3 Ficha técnica de los indicadores

Un indicador debe responder a una necesidad social real que haga necesaria su generación y su utilización;

como tal, debe cumplir con requisitos mínimos para su entendimiento e interpretación por parte de los usuarios. Para el desarrollo de los indicadores se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- **Aplicabilidad:** Debe responder a una necesidad real que haga necesaria su generación y su utilización.
- **No redundancia:** Debe expresar por sí mismo al fenómeno sin ser redundante con otros indicadores.
- **Interpretabilidad:** Debe ser fácil de entender para todos, especialistas y no especialistas.
- **Comparabilidad:** Debe ser comparable en el tiempo siempre y cuando utilice como base la misma información.
- **Oportunidad:** Debe ser medible inmediatamente se tengan disponibles los datos que se interrelacionan.

Es importante resaltar que estos criterios están relacionados con la utilidad y comprensión de los indicadores para el usuario.

Los indicadores son documentados, especificando la fórmula, además de algunos datos importantes. La tabla 3 muestra la ficha técnica de uno de los indicadores desarrollados en el estudio, el resto de indicadores tiene el mismo formato.

Tabla 3. Porcentaje de empresas con equipo tecnológico.

Porcentaje de Empresas con equipos tecnológicos	
Sigla	PEET
Objetivo	Medir la proporción de empresas encuestadas que cuentan con equipos de tecnología respecto a la totalidad de empresas encuestadas.
Definiciones	Empresas encuestadas con equipos tecnológicos son las empresas que cuentan con ellos, no implican si los usan o no.
Método de medición	Número de empresas encuestadas con equipos tecnológicos entre la totalidad de empresas encuestadas
Fórmula	$PEET = \left(\frac{EET}{EE} \right) * 100$
Variables	EET = Empresas con equipos tecnológicos EE = Total de Empresas Encuestadas
Limitaciones	Éste indicador no determina si las empresas usan los equipos tecnológicos que tienen en sus empresas. Tampoco determina el tipo de equipo tecnológico.

6. Resultados

En el estudio del uso de las TIC de las empresas agroindustriales en la provincia de Chiriquí se empleó el método de encuesta de recolección de datos. La razón por la cual se empleó este método es porque no existía un estudio anterior a este, ya sea privado (personas que no pertenecen al gobierno), o del Estado (ministerios o autoridades del país enfocadas en estas áreas).

La provincia de Chiriquí cuenta actualmente con 13 distritos, pero en esta investigación se presentan datos de 8 de ellos. La razón por la cual no se pudo aplicar a los otros 5 distritos la encuesta es que no había suficiente información para localizar las empresas en estudio. Pero aquí se presentan varios de los distritos con mayor auge económico de la provincia. En la tabla 4 se muestran la cantidad de empresas encuestadas por distrito.

Tabla 4. Empresas por distrito

Encuesta PYMESTIC	
Total de empresas encuestadas: 150	
Distrito	Cantidad de empresas encuestadas
Alanje	2
Barú	6
Boquerón	13
Boquete	23
Bugaba	40
David	46
Dolega	19
San Lorenzo	1

A continuación se puede observar la información en las tablas 5, 6, 7, 8 y 9, clasificada de acuerdo al indicador que corresponde. La encuesta recogió más datos que se pueden utilizar para estudios futuros, pero en este caso, solo utilizaron los más relevantes.

En la tabla 5 se muestran los resultados a la pregunta de la encuesta: *¿Su empresa cuenta con equipos tecnológicos?*. Los resultados seccionados por distrito ayudan a evaluar la situación en cada uno de ellos, al compararlos con la cantidad de empresas encuestadas en cada distrito, en la tabla 4 se aprecia esta información.

En términos generales, solo un tercio de las empresas a las que se les aplicó la encuesta respondieron que contaban con equipos tecnológicos. En muchas de ellas no se están utilizando, aunque cuentan dichas herramientas, principalmente porque carecen del recurso

humano capacitado y desconocen los beneficios que estas pueden generar.

Tabla 5. Datos de empresas con equipos tecnológicos

Empresas que cuentan con equipos tecnológicos		
Total de empresas: 57		
Distrito	Cantidad de empresas	%
Alanje	0	0
Barú	2	33
Boquerón	0	0
Boquete	15	65
Bugaba	14	35
David	17	40
Dolega	9	47
San Lorenzo	0	0

En una empresa, típicamente se utilizarán uno o más tipos de redes de comunicación. Por ejemplo: existirá una red de área local para intercomunicar empleados con servicios como impresoras y directorios compartidos, además de una conexión de red al *Internet* para visitar páginas Web y enviar correos a clientes. Para determinar esta información se realizó la pregunta: *¿Utiliza algún tipo de red la empresa?* Si la respuesta era afirmativa se procedía a preguntar cuáles de las redes utilizaba, una de las opciones era *Internet*. Según los datos que se presentan en la tabla 6, como resultado de la encuesta, más de un tercio de las empresas cuentan con *Internet*. Muchas de ellas no cuentan con esta red, porque no hay empresas que brinden el servicio en los lugares donde se encuentran estas empresas. Otras no la consideran necesaria para el negocio, ya que son pequeñas empresas y sienten que no es algo que necesiten y otras desconocen los beneficios que *Internet* le puede brindar a la empresa. Los distritos más desarrollados son los que consideran importante el adelanto tecnológico junto con el desarrollo empresarial, por pequeña que sea la empresa, como se demuestra en los números de respuestas afirmativas presentadas.

Tabla 6. Datos de empresas con *Internet*

Empresas que cuentan con <i>Internet</i>		
Total de empresas: 40		
Distrito	Cantidad de empresas	%
Alanje	0	0
Barú	2	33
Boquerón	0	0
Boquete	15	65

Bugaba	12	30
David	6	13
Dolega	5	26
San Lorenzo	0	0

Los sistemas informáticos se vienen integrando a las PyMEs poco a poco, ofreciendo evolución y desarrollo. Pero son muchas las razones por la que las empresas se muestran reacias a acoger estos avances. Entre estas razones se pueden mencionar: falta de conocimiento sobre cuál es el sistema que se debe adquirir, carencia de recurso humano capacitado para el manejo de los sistemas informáticos, poco presupuesto para adquirirlos, entre otras.

Para recolectar estos datos, la pregunta realizada fue: *¿Utiliza algún sistema informático?* En la tabla 7 se pueden apreciar los datos generados de esta pregunta.

Tabla 7. Datos de empresas con Sistemas Informáticos

Empresas que cuentan con Sistemas Informáticos		
Total de empresas: 34		
Distrito	Cantidad de empresas	%
Alanje	0	0
Barú	2	33
Boquerón	0	0
Boquete	10	43
Bugaba	4	10
David	10	21
Dolega	8	42
San Lorenzo	0	0

Uno de los avances más notorios, es la facilidad que brindan las entidades bancarias para realizar trámites desde cualquier lugar, en este caso, desde la empresa.

Se ofrece el servicio de banca en línea, y tan solo contar con *Internet* permite realizar cualquier trámite bancario. Sin embargo, la duda es si resulta confiable realizar estos trámites por *Internet*. Muchos de los más jóvenes, que conocen las ventajas y seguridad que ofrecen los bancos en este servicio, no tiene problema alguno con implementarlo en su empresa; no así los que llevan generaciones realizando todo de una manera diferente.

En la tabla 8 se detalla por distrito las empresas que realizan trámites bancarios en línea. David y Boquete son los que destacan, ya que uno es un distrito con mucho avance, porque es la cabecera de la provincia, y el otro cuenta con un gran auge turístico que ha permitido la entrada de tecnología en el área.

Tabla 8. Datos de empresas que realizan trámites bancarios por *Internet*

Empresas que realizan trámites bancarios por <i>Internet</i>		
Total de empresas: 36		
Distrito	Cantidad de empresas	%
Alanje	0	0
Barú	2	33
Boquerón	0	0
Boquete	10	43
Bugaba	6	15
David	11	23
Dolega	7	36
San Lorenzo	0	0

Las redes sociales están siendo de gran apoyo a muchas empresas, ya sea por la publicidad gratuita que se puede realizar, o por la facilidad de comunicación cliente-empresa. Es algo relativamente nuevo para el sector rural, por lo que muchos no conocen el término, y esta es una de las razones por las cuales muchas empresas de las encuestadas no están en redes sociales.

Los datos presentados en la tabla 9 muestran las cifras actuales, aunque no muchas empresas cuentan con redes sociales, la mayoría las considera muy útiles para el desarrollo del negocio.

Tabla 9. Datos de empresas que usan Redes Sociales

Empresas que usan Redes Sociales		
Total de empresas: 39		
Distrito	Cantidad de empresas	%
Alanje	0	0
Barú	1	17
Boquerón	0	0
Boquete	17	74
Bugaba	7	18
David	11	24
Dolega	3	16
San Lorenzo	0	0

6.1 Análisis de resultados

Luego de clasificar la información y analizar los datos recogidos, se obtienen los resultados de los indicadores desarrollados.

Los resultados de esta investigación dependieron de varios factores, tales como:

- Poca información sobre la localización geográfica de las PyMEs agroindustriales en la provincia de Chiriquí.

- Muchas de estas empresas no están registradas en los municipios correspondientes, por lo cual no cuentan como una empresa formada.
- Los dueños o administradores temen dar información de sus empresas, aunque no sea información sensible.
- Se desconocen los conceptos de TIC en el sector agroindustrial de la provincia de Chiriquí.

Por los factores antes mencionados, la muestra de PyMEs agroindustriales de la provincia de Chiriquí es de 150 empresas encuestadas, de un total aproximado de 500 PyMEs agroindustriales en la provincia de Chiriquí.

En la figura 5 se muestra que el 38% de la muestra general son empresas que cuentan con algún equipo tecnológico. La mayoría de estas empresas utilizan los equipos para ofimática, algunos para generar la planilla de los empleados.

A su vez, esta pregunta está asociada a otra pregunta que buscaba entender por qué no usan equipo tecnológico y lo resultados fueron los siguientes: 50% indicó que los costos de los equipos son muy altos, el 20% que por falta de los beneficios observables, mientras el 25% tiene desconocimiento del uso de los equipos y el 5% mencionó otras razones.

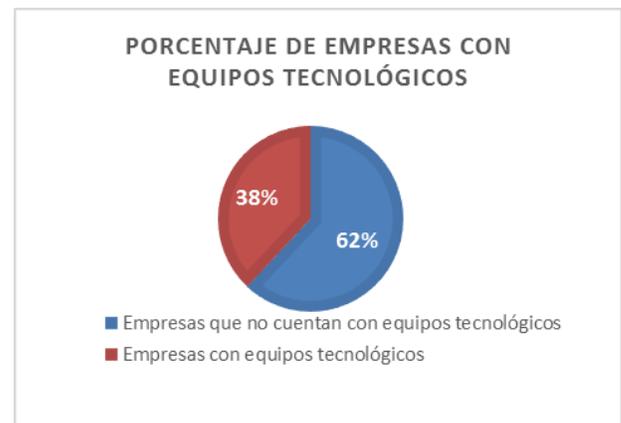


Figura 5. Porcentaje de empresas con equipo tecnológico.

La fórmula para este indicador es la siguiente:
 Fórmula:

$$PEET = \left(\frac{EET}{EE} \right) * 100 \quad (1)$$

$$PEET = \left(\frac{57}{150} \right) * 100$$

$$PEET = 38\% \text{ Empresas}$$

Donde *PEET* representa el Porcentaje de Empresas con Equipo Tecnológico, *EET* Empresas con Equipo Tecnológico y *EE* Empresas Encuestadas.

En la Figura 6 se especifica que sólo el 26.67% de las empresas encuestadas tienen *Internet*.

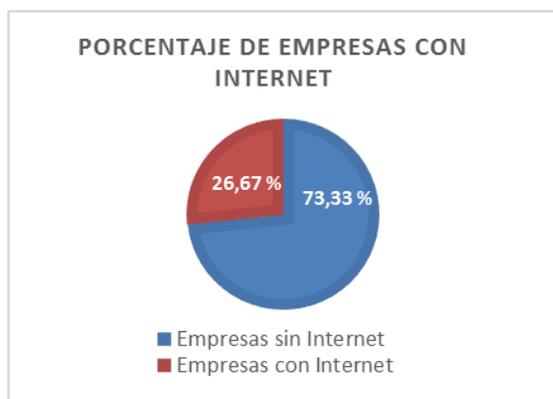


Figura 6. Porcentaje de empresas con *Internet*.

La fórmula del indicador es la siguiente:

Fórmula:

$$PEI = \left(\frac{EI}{EE} \right) * 100 \quad (2)$$

$$PEI = \left(\frac{40}{150} \right) * 100$$

$$PEI = 26.67\% \text{ Empresas}$$

Donde *PEI* representa el Porcentaje de Empresas con *Internet*, *EI* Empresas con *Internet* y *EE* Empresas Encuestadas.

En la figura 7 se aprecia el porcentaje de la cantidad de empresas que cuentan con sistemas informáticos respecto al total de empresas encuestadas, el cual representa solo el 22.67%. Algunos de los encuestados mencionaron que utilizan el *Internet* para consulta de

productos que necesitan para sus empresas, para contactar clientes a través de correo electrónico.



Figura 7. Porcentaje de empresas con Sistemas Informáticos.

La fórmula para este indicador es la siguiente:

Fórmula:

$$PESI = \left(\frac{ESI}{EE} \right) * 100 \quad (3)$$

$$PESI = \left(\frac{34}{150} \right) * 100$$

$$PESI = 22.67\% \text{ Empresas}$$

Donde *PESI* representa el Porcentaje de Empresas con Sistemas Informáticos, *ESI* Empresas con Sistemas Informáticos y *EE* Empresas Encuestadas.

Muchas empresas aun no acogen los avances de tecnología, como los trámites bancarios por *Internet*. Sin embargo la encuesta demostró que el 26% se está adaptando a este servicio, en la figura 8 se puede apreciar esta información.



Figura 8. Porcentaje de empresas que hacen trámites bancarios por *Internet*.

La fórmula del indicador es la siguiente:

Fórmula:

$$PETBI = \left(\frac{ETBI}{EE} \right) * 100 \quad (4)$$

$$PETBI = \left(\frac{36}{150} \right) * 100$$

$$PETBI = 24\% \text{ Empresas}$$

$$PERS = \left(\frac{ERS}{EE} \right) * 100 \quad (5)$$

$$PERS = \left(\frac{36}{150} \right) * 100$$

$$PERS = 26\% \text{ Empresas}$$

Donde *PETBI* representa el Porcentaje de Empresas que hacen Trámites Bancarios por *Internet*, *ETBI* Empresas con Trámites Bancarios por *Internet* y *EE* Empresas Encuestadas.

Las redes sociales no solo representan una herramienta de *marketing* para las PyMEs, sino que también les ayuda a mejorar la relación con los clientes y actúan como fuente de conocimiento. Así mismo constituyen un medio para conseguir clientes, especialmente para aquellas empresas que presentan un crecimiento más dinámico. A pesar de estas ventajas, solo el 26% de las empresas encuestadas utilizan las redes sociales, en la figura 9 se puede apreciar este porcentaje.



Figura 9. Porcentaje de empresas con Redes Sociales.

La fórmula del indicador es la siguiente

Fórmula

Donde *PERS* representa el Porcentaje de Empresas con Redes Sociales, *ERS* Empresas con Redes Sociales y *EE* Empresas Encuestadas.

A continuación se presenta un caso de estudio que permite ilustrar como las PyMEs de la provincia de Chiriquí han estado utilizando las TIC y obteniendo beneficios potenciales.

6.2 Caso de estudio

El café es un excelente ejemplo del tipo de nichos de mercado a los que se puede acceder de manera rentable a través de *Internet*. Gracias a las modernas subastas en *Internet*, los agricultores y procesadores han podido lograr precios y volúmenes de ventas significativos. Antes, el café cambiaba inevitablemente de manos muchas veces entre el productor y el comprador. De hecho, la mayoría del café que hoy se vende todavía utiliza el sistema antiguo de comercialización; sin embargo, el café se está vendiendo cada vez más de manera directa, utilizando para ello medios tecnológicos. Un ejemplo de esto es la **Finca Nuguo**, la cual se ubica en las tierras altas de la localidad de Jurutungo del distrito de Renacimiento, cuenta con más de tres décadas en la producción de café. Hace un par de años empezaron a utilizar tecnologías para la producción y comercialización del café. Uno de los tipos de café que produce es Geisha, un gran número de sus compradores para este producto son clientes del extranjero, para comunicarse con ellos utilizan su página Web y redes sociales como *WhatsApp*, *Facebook* e *Instagram*. Han grabado videos con Drones, los cuales han colocado en *Facebook*, en estos videos se pueden apreciar la finca y las plantaciones de café, lo cual ha permitido que los clientes conozcan un poco de las plantaciones y del café que producen.

Por su parte, el gerente de la empresa indicó que controlar y registrar de qué lote o sección de la finca proviene cada café, almacenarlo, contabilizarlo y controlar procesos. En secado: temperaturas, tiempos, periodos de descanso, niveles de humedad, y ligar todo

lo anterior al resultado de ofrecer un café de calidad, también está relacionado al uso de las TIC. A su vez, las herramientas tecnológicas de uso comercial, la presencia en la Web, redes sociales y comercio electrónico, han permitido que conozcan a esta empresa y que los contacten clientes interesados en su producto. Por otro lado, esta finca ha participado las subastas vía *Internet* de cafés de alta calidad, lo cual ha contribuido a aumentar los ingresos y ha aportado mejoras de eficiencia tanto para ellos como vendedores, así como para los compradores.

7. Conclusiones y trabajo futuro

Las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) y el conocimiento, cobran una dimensión sumamente importante, poniendo en evidencia la necesidad de considerar cambios en los patrones productivos, en la inversión y en la forma en la que se considera la producción de bienes, dejando de ver la misma como una actividad tangencial de nuestra economía y situándola al igual que los servicios como una actividad vital y estratégica para el desarrollo.

La menor adopción de las TIC en las PyMEs latinoamericanas se explica por el desconocimiento de los beneficios de estas tecnologías para el negocio y, sobre todo, por razones de índole financiera. En este estudio se evidencia la falta de orientación en las PyMEs agroindustriales en la provincia de Chiriquí sobre el uso de TIC en sus negocios, y los beneficios potenciales que estas generan cuando se implementan, ya que gran porcentaje considera desconocimiento total o parcial de las importantes oportunidades que ofrecen las TIC (especialmente *Internet*), carencia de recurso humano capacitado en esta área, no se visualiza como prioridad para la organización. Además, la mayoría de las empresas encuestadas tiene la opinión, que la adopción de las TIC representa fuertes montos de inversión y los beneficios no se captan en el corto plazo y medio plazo. Un reto importante que no sólo las empresas deben enfrentar, sino también el gobierno mediante políticas que den a conocer las ventajas que trae el uso de TIC, así como establecer programas de financiamiento que permitan a este importante grupo de empresas acceder de manera más rápida a la adopción de las TIC.

En cuanto al trabajo futuro se pretende extender el estudio a otros sectores y en otras provincias. Además,

generar nuevos indicadores con la información que arrojó este estudio y plantear otros.

8. Agradecimiento

Este trabajo fue financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT) a través del Sistema Nacional de Investigación (SNI), la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) y el Grupo de Investigación GITCE. Agradecemos a las empresas que colaboraron al suministrar la información para esta investigación.

9. Referencias

- [1] NU. CEPAL. Economía digital para el cambio Estructural y la Igualdad. CEPAL, Naciones Unidas. Impreso en Santiago de Chile, marzo 2013
- [2] N. Pedraza, A. Sánchez, F. García. “La importancia de la adopción de TIC en las PyMEs Mexicanas: una propuesta metodológica”. Revista Académica de Economía N° 66, ISSN 1696-8352, 2006
- [3] D. Osterlof. “Las TIC como instrumento para acceder al mercado mundial”. Red Latinoamericana de Política Comercial. ISSN 2222-4823, 2011.
- [4] OCDE. (2012). Quality Framework and Guidelines for OECD Statistical Activities.
- [5] Global Information Technology Report 2015. The Networked Readiness Index Rankings [En línea]. Disponible en: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_IT_Report_2015.pdf
- [6] A. Ojeda. “Gestión tecnológica en las PyMEs agroindustriales del Departamento del Atlántico”. TEACS, año 4, Número 09, 2012.
- [7] D. Fonseca. “Desarrollo e implementación de las TICS en las PYMES de Boyacá – Colombia”. Faedpyme International Review. Vol 2. Num. 4, 2013.
- [8] M. Saavedra. “El uso de las tecnologías de información y comunicación TIC en las micro, pequeñas y medianas empresas (MIPyME) industriales mexicanas”. Enl@ce Revista Venezolana de Información, Tecnología y Conocimiento, 10 (1), 85-104, 2013.
- [9] A. Ca’ Zorzi. Las TIC en el desarrollo de la PyME: Algunas experiencias de América Latina. [En línea]. Disponible en: <http://pymespracticas.typepad.com/files/tic-y-pymes-en-al-final-2011.pdf>
- [10] A. Dominguez. “La Gestión de los sistemas de información en la empresa”. Ediciones Pirámides, Madrid, 2012
- [11] W. Till. “Information Management and IT Strategy”. Material de lectura correspondiente a la Escuela de Verano Internacional en Economía y Gestión. La Habana., 2014
- [12] DANE. Metodología de Línea Base de Indicadores. Bogotá, Colombia. [En línea]. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/sen/planificacion/metodologia/metodologia_indicadores.pdf, Agosto 2009.
- [13] A. Ureña, M. Ballester, E. Prieto. “Análisis sectorial de implantación de las TIC en la pyme española”. pp 205. 2015.

Portal de REVISTAS ACADÉMICAS UTP

INICIO ACERCA DE ÁREA PERSONAL BUSCAR

Inicio > Portal de Revistas Académicas UTP

Portal de Revistas Académicas UTP

Bienvenido al Portal de Revistas Académicas de la Universidad Tecnológica de Panamá. Este sitio es un componente del proyecto Repositorio Institucional (UTP-Ridda2). Muestra la producción científica de docentes, investigadores y estudiantes. Iniciativa que desarrolla la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión, la Dirección de Comunicación Estratégica y Editorial Universitaria, con el apoyo de las autoridades de esta casa de estudios.

[A](#) [B](#) [C](#) [D](#) [E](#) [F](#) [G](#) [H](#) [I](#) [J](#) [K](#) [L](#) [M](#) [N](#) [Ñ](#) [O](#) [P](#) [Q](#) [R](#) [S](#) [T](#) [U](#) [V](#) [W](#) [X](#) [Y](#) [Z](#) [Todo](#)



I+D Tecnológico

Desde 2002 se propuso la edición de la Revista de I+D Tecnológico (*P-ISSN 1680-8894 & E-ISSN 2219-6714*), con el propósito de promover la labor de investigación en el ámbito nacional e internacional.

La Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC) es una revista abierta (OA) evaluada por pares (doble ciego) con publicación semestral de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), especializada en las áreas de las ciencias básicas e ingeniería y otras áreas del conocimiento.

[VER REVISTA](#) | [NÚMERO ACTUAL](#) | [REGISTRARSE](#)



Prisma Tecnológico

Prisma Tecnológico (*P-ISSN 2076-8133 & E-ISSN 2312-637X*)

Es una publicación anual de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) bajo el sello Editorial Tecnológica. Es una revista abierta, indexada a Latindex, que ofrece artículos de contenido tecnológico y científico multidisciplinarios, su objetivo es divulgar conocimiento técnico-científico, comunicar temas de ingeniería, ciencias básicas y exactas, y presentar temas sociales desde una perspectiva técnica-científica, a profesionales y estudiantes de las diversas áreas de la ingeniería, así como al público nacional e internacional, de manera comprensible y amena, con claridad, amplitud y responsabilidad.

[VER REVISTA](#) | [NÚMERO ACTUAL](#) | [REGISTRARSE](#)



Revista de Iniciación Científica

RIC (*P-ISSN 2412-0464 & E-ISSN 2413-6786*), es una revista abierta a la difusión, a los intercambios y a los debates de interés de la comunidad universitaria, esencialmente a nivel de pregrado, con el objetivo de promover la creación, la expresión y la diseminación de trabajos novedosos y empíricos. En RIC se publican, prioritariamente trabajos originales relacionados con los temas de ciencias, tecnología e ingeniería, desarrollados por estudiantes de licenciatura, en español, portugués o en inglés, incluyendo resultados de trabajos de términos de grado y otros trabajos de investigación desarrollados en pregrado.

[VER REVISTA](#) | [NÚMERO ACTUAL](#) | [REGISTRARSE](#)

OPEN JOURNAL SYSTEMS

Servicio de ayuda de la revista

USUARIO/A

Ha iniciado sesión como...
dannym

- Mis revistas
- Mi perfil
- Cerrar sesión
- Cerrar sesión de usuario/a

IDIOMA

Escoge idioma

Spanish

CONTENIDO DE LA REVISTA

Buscar

Ámbito de la búsqueda

Todo



UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA
DE PANAMÁ

El **Portal de Revistas Académicas UTP**, es un componente del proyecto **UTP-RIDDA2** (Repositorio institucional de acceso abierto de la Universidad Tecnológica de Panamá).

Componentes del Repositorio Institucional

- Portal de Revistas
- Repositorio de Investigación
- Repositorio de Tesis
- Repositorio de Organizacional
- Repositorio de Académico

Objetivo General del Portal de Revistas

Mejorar la visibilidad de las publicaciones científicas de la Institución a nivel nacional e internacional a través del uso de un sistema de gestión, de información y de consulta ágil y de uso internacional.

Visítenos en:

<http://www.revistas.utp.ac.pa>

No es necesario registrarse para tener acceso a los contenidos de las revistas

Camino a la excelencia a través del mejoramiento continuo



Universidad Tecnológica de Panamá
Campus Universitario Dr. Víctor Levi Sasso,
Edificio de Postgrado, Planta Baja.
Teléfono: (507) 560-3703 | (507) 560-3442
Correo Electrónico: editorial@utp.ac.pa
Web: www.utp.ac.pa
Apartado Postal 0819-07289 El Dorado,
Panamá, República de Panamá.