

Ciencia en la frontera

Revista de ciencia y tecnología de la UACJ

Luis Fernando Plenge Tellechea
Jorge Alberto Pérez León
(Coordinadores)

UACJ



Ciencia en la frontera:
revista de ciencia y tecnología
de la Universidad Autónoma
de Ciudad Juárez

DIRECTORIO

Jorge M. Quintana Silveyra
Rector

David Ramírez Perea
Secretario General

Martha P. Barraza de Anda
Coordinadora General de
Investigación y Posgrado

Hugo Staines Orozco
Director del ICB

Servando Pineda Jaimes
Dirección General de Difusión
Cultural y Divulgación Científica

CONSEJO EDITORIAL

Emilio Álvarez Parrilla
Leonel Barraza Pacheco
Alejandro Donohue Cornejo
Esaúl Jaramillo
Alejandro Martínez
Francisco Molinar Holguín
Antonio de la Mora
Helvia Pelayo Benavides
Luis Fernando Plenge
Joaquín Rodrigo García
Laura de la Rosa
Hugo Staines Orozco
Gilberto Reyes Leal
Yolanda Loya

DIRECTOR
Luis Fernando Plenge

FORMATO
Tomás Enrique Barragán Abreu

CONSEJO EDITORIAL INTERNACIONAL

Álvaro Álvarez Parrilla

Fac. Ciencias, Matemáticas, UABC,
Ensenada, B. C.

Francisco Fernández Belda

Depto. de Bioquímica y
Biología Molecular (A), Universidad
de Murcia, Murcia, España.

Alex Frago Sierra

Fac. de Química. Universidad
de La Habana, Cuba.

Jorge Gardea Torresdey

Chemistry, UTEP, El Paso, Texas.

Armando Gómez Puyou

Investigador Emérito. Instituto de
Fisiología Celular, Depto. Bioquímica,
UNAM. México, D. F.

Gustavo González

Tecnología de Alimentos de
Origen Vegetal, CIAD
Hermosillo, Sonora, México.

Louis Irwin

Biological Science, UTEP, El Paso, Texas.

José Luis Ochoa

CIBNOR, La Paz, B.C.S.

Esther Orozco

CINVESTAV, México, D. F.
Biomedicina Molecular.

María Jesús Periago

Depto. de Bromatología e Inspección de Alimen-
tos, Universidad de Murcia, Murcia, España.

Gaspar Ros Berruezo

Depto. de Bromatología e Inspección
de Alimentos, Universidad de Murcia,
Murcia, España.

Rocío Salceda Sacanelles

Instituto de Fisiología Celular, Depto.
Neurociencias, UNAM, México, D. F.

Fernando Soler

Depto. de Bioquímica y Biología
Molecular (A), Universidad de
Murcia, Murcia, España.

Marieta Tuena de Gómez Puyou

Investigadora Emérita. Instituto de Fisiología
Celular, Depto. Bioquímica, UNAM.
México, D. F.

José Vázquez Tato

Fac. de Ciencias, Depto. de
Química Física. Universidad de
Santiago de Compostela,
España.

Ricardo Tapia Ibarguengoytia

Neurociencias
IFC-UNAM

Herminia Pasantes

Neurociencias
IFC-UNAM

Thomas Kretzschmar Steinle

Área de Geofísica
CICESE en Ensenada
Baja California, México

Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ / Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,
Coordinación General de Investigación y Posgrado. Vol. 7. (2009). Ciudad Juárez, Chih.: UACJ, 2007.

v. ; 21 cm.

Seriada

1. Ciencias Puras – Publicaciones Periódicas
2. Ciencias Aplicadas – Publicaciones Periódicas
3. Ingeniería – Publicaciones Periódicas

Q4.R48 1999

505.R48 1999

Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ, Vol. 7, núm. 4, 2009, es una publicación semestral del Instituto de Ciencias Biomédicas a través de la Coordinación de Investigación y Posgrado del ICB y el Departamento de Ciencias Básicas. Reserva al uso exclusivo otorgada por INDAUTOR Núm. 4-2007-030513570700-01 y el ISSN 2007-042X. Publicidad, anuncios y suscripciones, dirigirse a: *Ciencia en la frontera*: revista de ciencia y tecnología de la UACJ, Heroico Colegio Militar 3775, 32310 Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Tel. (656) 688 18 85. Hecho en México/Printed in Mexico. Copyright © UACJ

Los manuscritos propuestos para publicación en esta revista deberán ser inéditos y no haber sido sometidos a consideración a otras revistas simultáneamente. Al enviar los manuscritos y ser aceptados para su publicación, los autores quedan que todos los derechos se transfieren a *Ciencia en la frontera*: revista de ciencia y tecnología de la UACJ, quien se reserva los de reproducción y distribución, ya sean fotográficos, en micropelícula, electrónicos o cualquier otro medio, y no podrán ser utilizados sin permiso por escrito de *Ciencia en la frontera*: revista de ciencia y tecnología de la UACJ, véase además notas para autores.

Permisos para otros usos: el propietario de los derechos no permite utilizar copias para distribución en general, promociones, la creación de nuevos trabajos o reventa. Para estos propósitos, dirigirse a *Ciencia en la frontera*: revista de ciencia y tecnología de la UACJ, correo electrónico fplenge@uacj.mx.

CONTENIDO

<i>Diseño y fabricación de un concentrador solar</i> Ricardo Enrique Pérez Blanco, Jenaro Carlos Paz Gutiérrez, Jesús Rodarte Dávila	5
<i>Métodos de estimación de canal para sistemas MC-CDMA con expansión en el dominio del tiempo</i> Víctor Hinostroza, Héctor Garcés y Alejandra Mendoza	13
<i>Estudio de la radiación solar incidente en la región de Ciudad Juárez</i> Ricardo Enrique Pérez Blanco, Jenaro Carlos Paz Gutiérrez, Jesús Rodarte Dávila	21
<i>Corrosión en dispositivos de enfriamiento automotriz</i> R. A. Saucedo-Acuña, E. G. Ordóñez-Casanova, L. A. Ramos, I. J. Salazar-Rodarte	29
<i>Metodología para diseñar un compresor de imágenes con pérdidas utilizando wavelets</i> Osslan Osiris Vergara Villegas, Humberto de Jesús Ochoa Domínguez, Vianey Guadalupe Cruz Sánchez y Leticia Ortega Máynez	35
<i>Modelo de navegación autónoma para vehículos robotizados en transporte urbano</i> Édgar A. Martínez García, Rafael Torres y Ricardo Ávila	47
<i>Proyecto N-derivadas en álgebras de Banach</i> Luis Gabriel Loeza Chin, Elifalet López González	57
<i>Historia y Resultados del Programa de Intercambio de Información entre México y Estados Unidos Referente a la temática de agua subterránea: caso de la región Paso del Norte (Chihuahua-Nuevo México-Texas)</i> Alfredo Granados Olivas, Erick Sánchez Flores, Hugo Luis Rojas Villalobos, Javier Chavez, John Hawley, Bobby Creel	61
<i>Restauración del Río Grande/Río Bravo en El Paso-Ciudad Juárez</i> Charles D. Turner, Trad.: Jorge A. Salas Plata Mendoza	71
<i>Parámetros biofísicos y de uso de suelo derivados de imágenes MODIS y Landsat para la evaluación de la dinámica territorial en la cuenca del Río Conchos, Chihuahua</i> Erick Sánchez Flores, Alfredo Granados Olivas.....	81
<i>Uso de tecnología para el entendimiento de la integral de línea en el contexto de electricidad y magnetismo</i> M. D. González-Quezada, S. Flores-García, M.C. Salazar-Álvarez, J.F. Estrada-Saldaña, E. Ordóñez-Casanova, F. Molina-Solano.....	89



■ ARTÍCULO ORIGINAL

Diseño y fabricación de un concentrador solar

Ricardo Enrique Pérez Blanco¹, Jenaro Carlos Paz Gutiérrez², Jesús Rodarte Dávila

RESUMEN

Además de tener una gran riqueza en hidrocarburos, México cuenta también con una variedad muy importante en recursos energéticos renovables, que se han aprovechado para generar energía eléctrica sin tener emisiones de gases contaminantes. En el norte del país y específicamente en el estado de Chihuahua, se cuenta con una gran incidencia solar, la cual es de las más altas a nivel nacional y mundial. Este recurso natural puede ser aprovechado para generar energía eléctrica. En este trabajo se presenta la construcción de un concentrador solar parabólico, por medio de la reconversión tecnológica de una antena usada para la televisión por satélite. La cual contará con un motor térmico tipo Stirling y un pequeño generador para convertir la energía térmica en energía eléctrica.

Palabras claves: Concentrador Solar, Energía fotovoltaica, Motor Stirling

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de energía es uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de una sociedad. Un modelo económico como el actual, cuyo funcionamiento depende de un continuo crecimiento, exige también una demanda igualmente creciente de energía, por lo que el consumo de energía eléctrica se ha convertido en parte esencial de la humanidad y su importancia es equiparable a la industrialización dependiente del petróleo. Ambos procesos exigen cantidades cada vez mayores de energía, siendo inevitable que en un determinado momento la demanda no pueda ser abastecida y

todo el sistema colapse, es por eso que se realizan búsquedas de nuevas fuentes de energía y nuevas formas de producir energía eléctrica no contaminante y renovable cuyo nombre se conoce como Energía Alternativa. Una fuente de energía alternativa es aquella que puede suplir a las energías o fuentes energéticas actuales, ya sea por su menor efecto contaminante o fundamentalmente por su posibilidad de renovación. Algunas de las acciones y objetivos contemplados en la Estrategia Nacional del Cambio Climático (SEMARNAT, 2007), en el Programa Sectorial de Energía (SENER, 2007) y en la Ley de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Chihuahua (LEEPAEC,

¹ riperez@uacj.mx

² jpaz@uacj.mx;

2005), son generar energía limpia utilizando fuentes no convencionales como son la velocidad del viento y la radiación solar. Sin embargo, no todas las regiones del país cuentan con estos recursos energéticos. Ciudad Juárez cuenta con una posición global privilegiada para el aprovechamiento de la radiación solar, en esta zona se registran incidencias solares con un factor anual de 6-7 kWh/m²/día (SNL, 2008), siendo de las más altas a nivel nacional (Estrada y Almanza, 2005).

Existen dos formas básicas de aprovechamiento de la energía solar, una de ellas es la energía solar fotovoltaica, que convierte las radiaciones solares en electricidad y la otra es la energía solar térmica que aprovecha el calor del Sol para calentar cosas o para producir electricidad (LEEPAEC, 2005). Una aplicación para el uso de energía solar térmica son los llamados discos parabólicos. Un disco parabólico es un tipo de colector solar que rastrea al Sol en dos ejes, reflejando la radiación solar y concentrando el calor en un motor térmico tipo Stirling que se sitúa en la parte central del foco de la parábola. El motor absorbe la energía térmica, esta energía puede ser convertida inmediatamente después mediante un generador a energía eléctrica. En este trabajo se presenta la generación de energía eléctrica a pequeña escala, por medio de un concentrador solar y un motor térmico tipo Stirling. Se muestran los resultados de un sistema de orientación y del sistema de generación de energía. En este último punto se hace una comparación del comportamiento de los valores obtenidos con datos proporcionados por el Laboratorio de Climatología y Calidad del Aire de la UACJ (LCCA).

2. ANTECEDENTES

Desde hace tiempo en la UACJ se han venido desarrollando proyectos en materia de energías renovables, algunos de ellos son “Aplicación de la Energía Solar en el Sistema de Aire Acondicionado de un Automóvil” (Carbajal y Rentería, 2003), “Estudio de factibilidad para Calentar e Iluminar un edificio con celdas solares” (Camarena, 2005), “Celdas de

Combustible: Una Fuente Alternativa de Energía Eléctrica” (Casas y Castillo, 2005), “Estudio de la Energía Fotovoltaica en Función de la Posición de las Celdas Solares” (Herrera y Cornejo, 2006) “Sistema Fotovoltaico con Energía de Respaldo de CFE aplicado en un Salón de Clases” (Terrones, 2007), “Seguidor y Cargador Solar, Utilizando un Sensor Inteligente Como Protección y Monitoreo de los Resultados” (Tamay y de Santiago, 2007); “Estudio de la Energía Fotovoltaica en Función del Comportamiento de la Posición de las Celdas Solares” (Pérez, 2008). También se han realizado estudios de la estimación solar en la zona, entre los que destacan las obras “Colectores Solares I” (Paz, 2006 Vol. 1), “Colectores Solares II” (Paz, 2006 Vol. 2), “Generación de imágenes para *web* con GDI+” (Paz, 2007). Todos los trabajos anteriores se han efectuado como respuesta a las necesidades surgidas de los problemas ocasionados por la contaminación del medio ambiente y buscando aprovechar los recursos energéticos renovables que posee Ciudad Juárez, Chihuahua. Principalmente la radiación solar, ya que es una de las más altas a nivel mundial.

3. DESARROLLO

3.1 Concentrador Solar

Para este proyecto se necesitó un plato con forma parabólica, que pudiera captar los rayos del Sol y que los concentrara en un punto. Se utilizó un plato de antena parabólica usada para recibir señales del sistema de televisión satelital, con un diámetro de 66 cm en buen estado, tal como se muestra en la figura 1. En esta figura también se puede apreciar el soporte del plato, es en la punta de este soporte donde se concentran los rayos del sol. Sin embargo este plato no tenía la reflectividad suficiente para concentrar los rayos en un punto y generar calor. Por lo que se buscó la manera de que el plato fuera reflectivo. Se hicieron pruebas con algunas pinturas, pero la reflectividad no era la idónea. La forma

que se encontró para hacer el plato reflectivo, fue la de comprar un espejo plástico, recortarlo y pegarlo en el plato. Por medio de Internet se localizó un proveedor de este material, se le contactó y se procedió a su compra. Se cortó el espejo plástico en triángulos para poder pegarlos, se tuvo mucho cuidado en que no quedaran partes del disco sin cubrir, ya que esto nos hubiera reducido la cantidad de radiación que queremos concentrar. Una vez terminado el pegado del espejo en el disco, se le puso una capa de pintura reflectiva para aumentar el nivel de reflexión del disco y por ende una mayor concentración de rayos en el foco. El disco terminado con el espejo plástico pegado y con la pintura reflectiva, se muestra en la figura 2.



Figura 1.- Plato parabólico.

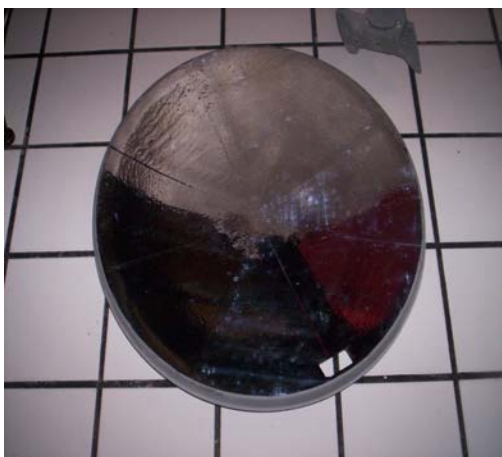


Figura 2.- Plato parabólico espejeado.

3.2 Sistema de Engranaje

Para mover la antena, se diseñó un sistema de engranaje con tres engranes y un balero. Se procedió

a buscar entre los establecimientos de piezas para carros usados (Yonke's), la marcha de un carro que se adecuara a las necesidades del proyecto. Las figuras 3 a y b muestran las piezas utilizadas en este trabajo. La idea básica de este sistema, es que un motor eléctrico esta acoplado al engrane pequeño y le transmite el movimiento al engrane más grande a través de un engrane intermedio.



Figura 3 a y b.- Sistema de engranaje de una marcha de automóvil.

3.3 Tablilla de Control

Se diseñó una tablilla para poder controlar el movimiento del concentrador solar. La figura 4 muestra las conexiones que se realizaron. En nuestro sistema la lectura inicial es dada por las fotorresistencias colocadas a los lados del concentrador solar, las fotorresistencias al ser expuestas a la luz solar nos dan un valor de voltaje. Este voltaje es interpretado como un "1" lógico y cuando no hay voltaje se interpreta como un "0" lógico. Los valores de las fotorresistencias son mandados a esta tablilla que tiene conectado un PIC 16f84 (Palacios 2006), el cual compara los dos valores y hace girar el motor hasta que en ambas resistencias encuentren un "1" lógico. Dependiendo de cuál valor de voltaje sea el mayor, es hacia dónde se hace girar el motor. Este sistema tiene como función seguir al Sol sobre la eclíptica. Las fotorresistencias, el motor y la tablilla de control son alimentadas por una pequeña celda solar que produce alrededor de 9 voltios, esto es una gran ventaja ya que hace que el sistema sea autónomo y no dependa de la energía eléctrica convencional para funcionar. Al atardecer cuando el Sol se pone, la celda solar deja de funcionar y

por ende todo el sistema de seguimiento. Si hubiera alguna fuente de luz (lámpara) que hiciera que las fotorresistencias generaran algún voltaje, esta señal no es interpretada por la tablilla por falta de energía de la celda solar. Con ello nos aseguramos de que el sistema no tenga movimiento alguno en la noche. En la mañana al salir al sol, la celda solar empieza a funcionar y hace que el plato se oriente de nuevo. En la figura 4 se observan los componentes usados en la tablilla.

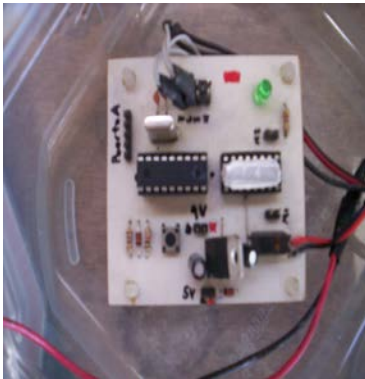


Figura 4.- Parte frontal de la tablilla.

3.4 Montaje del Concentrador Solar en la Base

Se colocó el concentrador solar en el tubo para poder hacer las pruebas de seguimiento del Sol. El concentrador solar montado en el tubo se muestra en la figura 5. En esta misma figura se muestra el motor que hará mover a los engranes y a su vez el concentrador solar.



Figura 5.- Sistema de engranaje con el disco parabólico instalado.

3.5 Motor Stirling

Para este trabajo se usó el motor Stirling C-7000. Este motor tiene un peso de medio kg, incluye un pequeño generador de electricidad, un LED y era relativamente fácil de armar. Una vez terminado el motor se veía como en la figura 6. Para usarlo en nuestro proyecto se le quitaron algunas partes como lo son la base, las llantas, el protector del vidrio y las aspas, entre otras. Antes de quitarle esas piezas fue necesario calibrar el motor Stirling, para que funcionara correctamente antes de montarlo en el concentrador solar. El ajuste se realizó usando como fuente de calor un mechero con alcohol. Se utilizó un vernier para ajustar la altura de los tornillos laterales, ya que si estaban a diferente altura esto ocasionaría que hubiera fricción entre el pistón y la cámara. Reduciendo la velocidad del motor y por consecuencia la cantidad de energía generada. Se instaló el motor Stirling de tal manera que la parte frontal quedara justo en el foco del concentrador solar. El concentrador solar con el motor Stirling instalado se muestra a continuación en la figura 7.

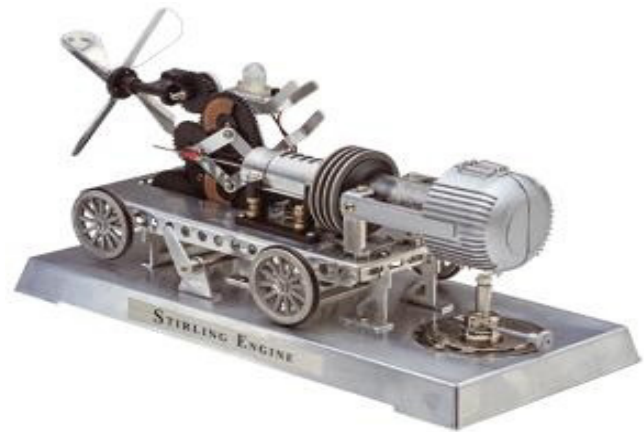


Figura 6.- Motor Stirling C-7000.



Figura 7.- Concentrador solar con motor Stirling.

3.6 Diagrama de flujo del concentrador solar

Como se puede observar en la figura 8, la fuente de inicio de nuestro sistema es la energía solar, la cual hace funcionar simultáneamente a 3 dispositivos. Por un lado esta energía es captada por el disco parabólico, para ser concentrada en el motor Stirling para que éste produzca movimiento y haga funcionar el generador y con ello producir un voltaje. Las fotorresistencias captan la luz del sol, siendo estas las que indican la rotación del disco ya sea al lado derecho o izquierdo según la cantidad de luz que incide directamente sobre ellas y esta señal es mandada directamente a la tablilla. Por último, una celda solar que también capta la luz del Sol para así poder hacer funcionar la tablilla y ejecutar el código de programa contenido en el PIC16F84A.

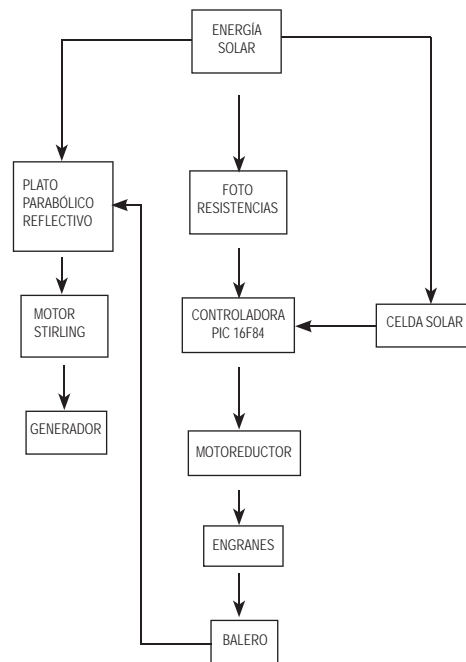


Figura 8.- Diagrama de flujo del concentrador solar.

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1 Sistema de Orientación

Las pruebas que se le realizaron al sistema de orientación fueron las siguientes: Se colocaba el plato orientado de manera contraria al Sol para que se orientara. Esta prueba se realizó varias veces a diferentes horas del día y en diferentes días, y en todas ellas se obtuvo un resultado satisfactorio. El tiempo de orientación máximo fue de 5 segundos. Un caso en particular se realizó antes de salir el sol; se colocó el plato de frente al Oeste y se esperó a que el Sol estuviera por encima del horizonte. Cuando la celda solar empezó a generar suficiente voltaje, el plato comenzó a moverse y quedó de frente al Sol.

4.2 Sistema de Generación de Energía

Al situarse el motor Stirling en el foco del concentrador de energía solar, la primera prueba nos mostró que el motor Stirling C-7000 no era capaz de transformar todo el calor de los rayos solares en energía eléctrica. Nos dimos cuenta porque una de las piezas se empezó a quemar. Para reducir la cantidad de radiación solar se le colocó una placa

con un orificio delante del motor. Las pruebas siguientes se realizaron de esta manera (ver figura 7). Una vez logrado el objetivo de hacer que el concentrador siguiera el Sol y de que el motor Stirling funcionara correctamente sin sufrir daño alguno, se procedió a caracterizar la generación de energía producida. Para ello se colocó un voltímetro a la salida del generador y se tomaron lecturas cada hora a partir de las 7 am hasta las 7 pm. Cabe señalar que para tiempos menores a las 7 am y mayores a las 7 pm, la celda solar no producía suficiente voltaje para mover el concentrador y siguiera al Sol. En la figura 9 se muestran los resultados de la variación de la energía eléctrica en función de la hora del día. Estas mediciones corresponden al día 7 de Mayo del año en curso. Vemos que no hay mucha diferencia en las lecturas de voltaje. Creemos que esto se debe a que el motor Stirling tiene una generación máxima de voltaje, alrededor de este valor. Sin embargo aun así, la curva tiene un comportamiento tipo Gaussiano, el cual es típico de la radiación que incide sobre una superficie plana.

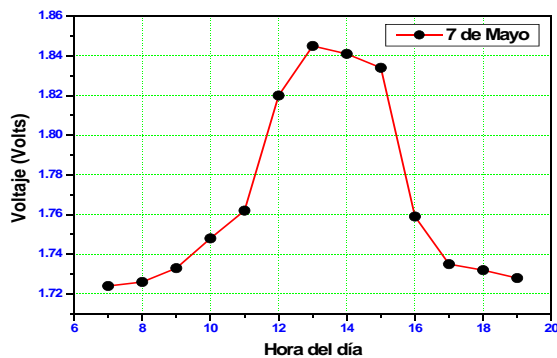


Figura 9.-Variación del voltaje en función de la hora del día.

De acuerdo con datos proporcionados por el LCCA (Datos, 2009), para el día 7 de Mayo, la salida del Sol fue a las 6:15 am y se metió a las 7:50 pm. Lo que nos da un total de 13.58 horas de luz natural. El Sol estuvo en el Cenit a las 13.04 horas. De la figura 9 se puede observar que la máxima generación de voltaje fue alrededor de las 13 horas, concordando con los datos proporcionados por el LCCA. Lo que nos indica que el motor Stirling se

comporta perfectamente. De las 13.58 horas de luz natural que se tienen se aprovechan 11.58, es decir cerca del 83 %. El otro 17 % restante es el tiempo en que sale (o se mete) el Sol y que la celda solar empieza (deja) a funcionar. Sin embargo, en necesario hacer más pruebas y a tiempos menores para reducir este porcentaje y tener una mejor caracterización del generador solar. Conforme avanza el día, se aumenta incidencia solar en el concentrador y por lo tanto aumenta la generación de voltaje por parte del motor Stirling. Esto sigue hasta que el Sol alcanza el Cenit, que es cuando el motor genera la mayor cantidad de voltaje. Después la incidencia solar disminuye, haciendo que también disminuya la generación de voltaje.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Jefatura del Departamento de Eléctrica y Computación por todo el apoyo brindado para la realización de este trabajo; así como al Ing. Francisco Freyre, Jefe del Laboratorio de Cómputo Avanzado y al Sr. Moisés Huerta por su ayuda técnica.

BIBLIOGRAFÍA

- Camarena Murillo, Federico Luciano. *Estudio de Factibilidad para Calentar e Iluminar un Edificio con Celdas de Energía Solar*. Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2005.
- Carvajal, Francisco y Rentería, Sergio. *Aplicación de la Energía Solar en el Sistema de Aire Acondicionado de un automóvil*. Ciudad Juárez, Chihuahua, México 2003.
- Casas Maldonado, Yazdhell Ali y Castillo Cuevas, Emerardo. *Celdas de Combustible: Una Fuente Alternativa de Energía Eléctrica*. Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2005.
- Datos proporcionados por el Laboratorio de Climatología y Calidad del Aire de la UACJ. Proporcionados el 8 de Mayo de 2009.
- Estrada-Cajigal, V. y Almanza, R. (2005). *Irradiaciones Global, Directa y Difusa, en Superficies Horizontales e Inclinadas, así como Irradiación*

- Directa Normal, en la República Mexicana.* Serie Investigación y Desarrollo. Universidad Autónoma de México. ISBN 970-32-2661-2.
- Herrera Pérez, César y Cornejo Carvajal, Ulises. *Estudio de la Energía Fotovoltaica en Función de la Posición de las Celdas Solares.* Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2006.
- LEEPAEC, *Ley de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Chihuahua.* 2005.
- Enrique Palacios Municio, Fernando Remiro Domínguez, Lucas J. López Pérez. *Microcontrolador PIC16F84. Desarrollo de proyectos.* México: Alfaomega Grupo Editor, enero 2006.
- Paz Gutiérrez, J., (2006). *Colectores Solares Planos.* Vol. 1. Tratamiento Teórico. 1ª edición. ISBN: 968-7845-78-3. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Paz Gutiérrez, J., (2006). *Colectores Solares Planos* Vol. 2. Construcción. 1ª edición. ISBN: 968-7845-79-1. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Paz, Gutiérrez J. (2007). Generación de imágenes para web con GDI+”, UACJ. ISBN: 978-968-7845-913. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Pérez Blanco, R.; Enríquez, Paz Gutiérrez, J; Muela, J.; Gándara Fernández, A. (2008). “Estudio de la Energía Fotovoltaica en Función del Comportamiento de la Posición de las Celdas Solares”. *Memorias de la Decimotercera Semana de Ingeniería.*
- Semarnat, Comisión Intersecretarial del Cambio Climático, México. CICC, 2007. Estrategia Nacional del Cambio Climático. ISBN 968-817-837-3. México. Disponible en: http://www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/politica_ambiental/cambioclimatico/Documents/enac/sintesis/sintesis ejecutiva/Estrat_nal_Sintesis%20español.pdf
- Sener, México. Programa Sectorial de Energía 2007-2012. Disponible en: <http://www.sener.gob.mx/webSener/res/0/Programa%20Sectorial%20de%20Energia%202007-2012.pdf>
- SNL, Sandia National Labs. Tomado de: <http://www.re.sandia.gov/sp/in/mr/solarmap1.pdf>, consultado el 3 de junio del 2008.
- Tamay Zapata, Israel y de Santiago Morales, Rafael. *Seguidor y Cargador Solar, Utilizando un Sensor Inteligente como Protección y Monitoreo de Resultados.* Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2007.
- Terrones Hidalgo, Jorge Alberto. *Sistema Fotovoltaico con Energía de Respaldo de CFE, Aplicado en el Alumbrado de un Salón de Clases.* Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2007.

■ ARTÍCULO DE REVISIÓN

Métodos de estimación de canal para sistemas MC-CDMA con expansión en el dominio del tiempo

Víctor Hinostraza¹, Héctor Garcés² y Alejandra Mendoza³

RESUMEN

En los sistemas de MCX-CDMA con expansión en el tiempo, los símbolos de datos y pilotos son expandidos en el tiempo y codificados en el tiempo. Para combatir los problemas de desvanecimiento, necesitamos usar la estimación de canal muy exacto. Es una combinación de dos métodos; un método bidimensional de estimación de canal y un método de estimación basado en la respuesta del impulso. Se evaluó este método por medio de simulaciones de computadora.

Palabras clave: MC-CDMA, expansión en el dominio del tiempo, estimación de canal, suma coherente, peso.

INTRODUCCIÓN

El método de acceso múltiple por división de código con portadoras múltiples (MC-CDMA), está basado en una combinación de CDMA y OFDM y es un serio candidato para los nuevos sistemas de comunicación inalámbrica. En los sistemas MC-CDMA, los símbolos de datos pueden ser expandidos en el dominio del tiempo o de la frecuencia usando un código expensor específico [1-6]. Se ha reportado que los sistemas de MC-CDMA que

están dispersos en el dominio del tiempo tienen mejor funcionalidad en BER que los sistemas MC-CDMA que están dispersos en el dominio de la frecuencia, los cuales se ven degradados por la interferencia de acceso múltiple en medios ambientes de alto desvanecimiento y selectividad de frecuencia, especialmente cuando se usan muchos códigos de multicanalización. Aún más, los sistemas de dispersión en el dominio del tiempo, pueden tener los efectos similares de diversidad de frecuencia que tienen los sistemas con dispersión en el dominio de

vhinostr@uacj.mx , (2) hgarces@uacj.mx , (3) alemendo@uacj.mx

la frecuencia, aplicando algoritmos de corrección de errores con entrelazado de bits en el dominio de la frecuencia. En sistemas MC-CDMA expandidos en el dominio del tiempo, es usual expandir los símbolos de datos y pilotos en el dominio del tiempo y multicanalizarlos con código. Utilizando esos símbolos piloto multicanalizados en código, es posible llevar a cabo una estimación de canal precisa.

Para los sistemas MC-CDMA con expansión en el tiempo, considerando solamente los símbolos piloto multicanalizados con código, es más efectivo utilizar símbolos piloto adyacentes en ambos dominios; tiempo y frecuencia. Para combatir la correlación de desvanecimiento entre símbolos piloto, la cual es determinada por atributos de propagación tales como la frecuencia Doppler máxima en el dominio del tiempo y la dispersión de retardo en el dominio de la frecuencia, se introduce aquí el concepto de un filtro bidimensional que calcula efectivamente los símbolos piloto en ambos dominios y se introduce el concepto a través de simulaciones de computadora. Para mejorar aún más la exactitud de la estimación de canal, se combinan el método basado en la respuesta al impulso con el método del filtro bidimensional mencionado arriba. La respuesta al impulso, la cual es obtenida aplicando la transformada de Fourier inversa a las respuestas de frecuencia estimadas, tiene la mayoría de los elementos de la multitrayectoria durante el intervalo de guardia, así que quitando los elementos que están fuera del intervalo de guardia, se puede obtener una mejoría en exactitud en la estimación de canal [7, 8]. Es importante para métodos de estimación de canal adaptivos como el que se propone, determinar el factor de peso apropiado para cada medio ambiente de desvanecimiento. Para sistemas OFDM, algunos estudios han examinado los factores de peso para el promedio de las estimaciones de canal en el dominio de la frecuencia, como lo hacen en [9] y sus referencias. Sin embargo, la integración de métodos basados en el promedio del tiempo, promedio en el dominio de la frecuencia y

en la respuesta al impulso no han sido propuestos. Aún más, la optimización de los factores de peso considerando las características de expansión en el dominio del tiempo de MC-CDMA no se ha llevado a cabo. Por lo tanto, en este trabajo se aclaran los factores de peso apropiados para este método propuesto de estimación de canal.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera: La sección II proporciona un vistazo a los sistemas MC-CDMA con expansión en el tiempo. Las secciones III y IV explican el método propuesto de estimación de canal. La sección V demuestra la funcionalidad BER del método e introduce una metodología fácil para implementar los métodos propuestos. Finalmente, la sección VI deriva algunas conclusiones.

SISTEMAS MC-CDMA CON EXPANSIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

En sistemas MC-CDMA con expansión en el tiempo, en cada sub-portadora, los símbolos piloto y de datos se expanden en el dominio del tiempo y son multicanalizados con códigos. Un intervalo de guardia, que es una copia de la parte final del siguiente símbolo OFDM, es transmitido antes de cada símbolo OFDM para evitar la interferencia entre símbolos (ISI) causada por el desvanecimiento de multitrayectoria. La estructura del transmisor es la típica de un transmisor OFDM. La señal transmitida pasa-bajas compleja equivalente de la m -ésima muestra en el x -ésimo chip de un símbolo OFDM es expresado como

$$s_{x,m} = \sum_{k=0}^{N_c-1} y_{k,x} e^{j2\pi \frac{km}{N_c}} \quad (1)$$

$$y_{k,x} = \sum_{c=0}^{N_p-1} d_{k,c} W_{c,x}$$

Donde N_c es el número de sub-portadoras, N_m

es el número de códigos multicanalizados, $d_{k,c}$ es el símbolo de datos de la subportadora k para el usuario c . El código de expansión para el usuario 0 $W_{0,x}$ es aplicado a los símbolos de piloto. La señal recibida $r_{x,m}$ se expresa como

$$r_{x,m} = \sum_{n=0}^{N_p-1} s_{s,m-p\Delta\tau} h_{x,p} + n_{x,m} \quad (2)$$

Donde N_p es el número de trayectorias recibidas, $h_{x,p}$ es la amplitud compleja de la trayectoria p en el x -ésimo símbolo OFDM, $\Delta\tau$ es el intervalo entre dos trayectorias adyacentes y $n_{x,m}$ es la señal de ruido. En este caso, la variación en el dominio del tiempo debido al desvanecimiento se considera despreciable durante la duración del símbolo. El símbolo recibido multi-canalizado en código de la sub-portadora k en el x -ésimo símbolo OFDM $y'_{k,x}$, está expresado como

$$y'_{k,x} = \frac{1}{N_c} \sum_{m=0}^{N_c-1} r_{x,m} e^{-j2\pi \frac{k'm}{N_c}} = y_{k,x} H_{k,x} + N_{k'} \quad (3)$$

$$H_{k,x} = \sum_{m=0}^{N_p-1} h_{x,p} e^{-j2\pi \frac{k'p\Delta\tau}{N_c}}$$

$$\text{Donde } N_{k'} = \frac{1}{N_c} \sum_{m=0}^{N_c-1} n_{x,m} e^{-j2\pi \frac{k'p\Delta\tau}{N_c}} \quad (4)$$

Se asumió que $H_{k,x} = H_{k'}$ ($0 \leq x \leq P_G$) para simplificar la explicación. En la simulación mostrada en las siguientes partes, no se usa esta presunción. El símbolo recibido de la subportadora k' para el usuario c -ésimo, $d'_{k',c}$, está expresado como

$$d'_{k',c} = \frac{1}{P_G} \sum_{x=0}^{P_G-1} y'_{k',x} W_{c',x} = d_{k',c} H_{k'} + N'_{k',c} \quad (5)$$

$$\text{Donde } N'_{k',c} = \frac{1}{P_G} \sum_{x=0}^{P_G-1} N_{k',x} W_{c',x} \quad (6)$$

La estructura del receptor es la típica de un receptor OFDM, con la salvedad de que este receptor realiza la evaluación de la respuesta al impulso. La compensación de cada símbolo de datos recibido se hace hasta que a cada símbolo se le quita la expansión. La estimación del canal es expresada como

$$E_{k'} = d'_{k',0} / d_{k',0} = H_{k'} + N'_{k',0} \quad (7)$$

Aquí $d_{k',0}$ especifica el símbolo piloto transmitido en la sub-portadora k' .

MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE CANAL BIDIMENSIONAL

En esta parte se aplica un método bidimensional de estimación de canal que ofrece alta exactitud para sistemas MC-CDMA en medios ambientes de propagación variable. El concepto básico de este método es adaptablemente seleccionar el número de símbolos de piloto en los dominios de tiempo y frecuencia de acuerdo al medio ambiente de propagación y sumar coherentemente esos símbolos piloto en la recepción [6]. Para llevar a cabo este método, se usaron símbolos piloto en un área fija, lo cuál significa que hay un número fijo de pilotos, se introdujeron factores de peso y se dio un peso a cada piloto con base a las condiciones de propagación del área. Este método es equivalente a cambiar el número de pilotos adaptivamente. Observe que este formato es más fácil de implementar debido a que los pilotos que son sumados coherentemente están fijos.

Cuando se usan $2N_t+1$ y $2N_f+1$ símbolos piloto en los dominios del tiempo y la frecuencia, respectivamente, $(2N_t+1)(2N_f+1)$ símbolos piloto son usados en total en la estimación de canal. Considerando que la correlación cae en función de la distancia entre símbolos, los pesos deben ser asignados en función de la distancia. Enseguida, λ_t

y λ_t son los factores de peso en los dominios de tiempo y frecuencia. La estimación de canal del t -ésimo símbolo de la f -ésima subportadora queda expresado como

$$E_s(t_i, f_i) = \frac{\sum_{t=t_i-N_t}^{t_i+N_t} \sum_{f=f_i-N_f}^{f_i+N_f} E_{t,f} \lambda_t^{|t-t_i|} \lambda_f^{|f-f_i|}}{\sum_{t=t_i-N_t}^{t_i+N_t} \sum_{f=f_i-N_f}^{f_i+N_f} \lambda_t^{|t-t_i|} \lambda_f^{|f-f_i|}} \quad (8)$$

Donde $E_{t,f}$ es la t -ésima estimación de canal de la f -ésima subportadora de la ecuación (7). El método de estimación convencional usa $\lambda_t = 1$ y $\lambda_f = 1$.

MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE CANAL BASADO EN LA RESPUESTA AL IMPULSO

Para mejorar la exactitud de la estimación de canal, se combinan el método de respuesta al impulso en combinación con el método bidimensional. La primera estimación del i -ésimo símbolo de la f -ésima subportadora, $E(t_i, f_i)$, la cual es obtenida por el método bidimensional de suma coherente, el cual está expresado como

$$E(t_i, f_i) = H_{t_i, f_i} + N_{t_i, f_i} \quad (9)$$

$N_{t,f}$ es el ruido, el cual también incluye el error de estimación dado por la ecuación (8). $H_{t,f}$ es la respuesta a la frecuencia y es descrita como sigue

$$H_{t_i, f_i} = \sum_{p=0}^{N_p-1} h_{t_i, p} e^{-j2\pi \frac{f_i p \Delta \tau}{N_c}} \quad (10)$$

En esta ecuación, N_p es el número de trayectorias recibidas, $\Delta \tau$ es el intervalo entre trayectorias y $h_{t,p}$ es la respuesta al impulso de la trayectoria p -ésima en el símbolo i -ésimo. La transformada inversa de Fourier de los estimados de canal representa la respuesta al impulso estimado. En este método, primero se obtiene la respuesta estimada $T_{t,m}$ transformando inversamente con Fourier la pri-

mera estimación de canal.

$$T_{t,m} = \sum_{f_i=0}^{N_c-1} E(t_i, f_i) e^{j2\pi \frac{f_i m}{N_c}} = h_{t,m} + \sum_{f_i=0}^{N_c-1} N_{t_i, f_i} e^{j2\pi \frac{f_i m}{N_c}} \quad (11)$$

Los componentes de multitrayectoria están normalmente contenidos en la duración del intervalo de guardia de la respuesta al impulso. En otras palabras, los elementos que están fuera del intervalo de guardia de la respuesta estimada al impulso es solamente ruido. Por lo tanto, una estimación de la respuesta al impulso más exacta puede ser obtenida si se quita el ruido. Como paso final, esta respuesta al impulso refinada se transforma con FFT para convertirla en una segunda estimación de canal. La SNR de la segunda estimación de canal se ha refinado con la remoción del ruido de la respuesta al impulso original. Cuando el número de muestras del intervalo de guardia y el símbolo OFDM son N_G y N_C respectivamente, los SNR de la segunda estimación de canal se ven mejorados en N_C/N_G comparadas con el original.

La segunda estimación de canal del t -ésimo símbolo en la subportadora f -ésima está expresada de la siguiente manera

$$E'(t_i, f_i) = \frac{1}{N_C} \sum_{m=0}^{N_G-1} T_{t_i, m} e^{-j2\pi \frac{f_i m}{N_C}} = H_{t_i, f_i} + N'_{t_i, f_i} \quad (12)$$

Donde

$$N'_{t_i, f_i} = \frac{1}{N_C} \sum_{m=0}^{N_G-1} \sum_{f_i=0}^{N_c-1} N_{t_i, f_i} e^{j2\pi \frac{(f_i - f_i') m}{N_C}} \quad (13)$$

Este método basado en la respuesta al impulso se puede agregar al método bidimensional fácilmente. Aún cuando este método requiere de los procesos de IFFT y FFT adicionales, lo cual puede derivar en mayor costo de procesamiento, se puede alcanzar mejor exactitud en las estimaciones obte-

nidas por solamente el método bidimensional debido a la diferencia en la manera en que se refinan las estimaciones de canal.

Para las ecuaciones derivadas arriba se requiere que el número de subportadoras sea un factor de 2 y las trayectorias de desvanecimiento estén dentro de la sincronía de la muestra. Sin embargo, en aplicaciones prácticas, algunas subportadoras no se usan y las trayectorias de desvanecimiento no están en sincronía con el muestreo, de manera que es posible encontrar una pequeña degradación. Para prevenir esta degradación, varios métodos se han propuesto, tales como el método de la respuesta a la frecuencia virtual [11].

SIMULACIONES

Condiciones de simulación:

Los parámetros usados en la simulación son los siguientes: la separación entre sub-portadoras es 40 kHz y el número de sub-portadoras es 1024. La longitud del intervalo de guardia es $\frac{1}{4}$ de un símbolo OFDM, por ejemplo $6.25 \mu\text{s}$. La ganancia de procesamiento es 16 para los pilotos y los datos, 15 códigos se usan para usuarios y uno para piloto. Se usó código OVVSF como el código de expansión. La modulación usada es QPSK. El modelo de propagación usado tiene cinco trayectorias con desvanecimiento Rayleigh que tienen decaimiento exponencial de potencia promedio e intervalos iguales $\Delta\tau$ entre trayectorias. El factor de decaimiento

es 3 dB por trayectoria y cada trayectoria es sujeta a desvanecimiento Rayleigh con máxima frecuencia Doppler f_D . En el modelo, se usa la dispersión de retardo cambiando los intervalos entre trayectorias; la más larga trayectoria no excede el intervalo de guardia. Se asume que la sincronización de frecuencia y la sincronía de muestreo son ideales. Además, se asume que la interferencia de células adyacentes al quitar la expansión es equivalente a ruido blanco. Así que N_θ incluye el ruido blanco normal y el ruido blanco equivalente. En la simulación, la potencia recibida de los símbolos pilotos no se considera cuando se calcula el SNR de los símbolos de datos. Enseguida, se muestran los resultados de evaluación de los métodos propuestos, la combinación de los métodos de respuesta al impulso y el método bidimensional. Se asume que el número de pilotos usado en los dominios de tiempo y frecuencia son $N_t = N_f = 3$; 49 símbolos pilotos son usados en total para la suma coherente. El número de símbolos piloto debe ser decidido dependiendo de la correlación en cada dominio de tiempo y frecuencia. En lo que respecta a la correlación en el dominio de la frecuencia, el ancho de banda coherente puede ser determinado por $1/(5\sigma_s)$. Por lo tanto, si se considera una dispersión de retardo de $1 \mu\text{s}$, el ancho de banda coherente es 200 kHz, el cual corresponde a cinco subportadoras. Como se ve, asignar un número a los símbolos piloto en un problema complejo. Así que se asigno un número de tres sólo como ejemplo.

Tabla 1. Factores de peso óptimos para el método propuesto.
($E_b/N_0 = 10 \text{ dB}$ (20 dB))

$f_D \sigma_s$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	$\lambda_t = 1.0$ $\lambda_f = 1.0$ ($\lambda_t = 1.0$) ($\lambda_f = 1.0$)	$\lambda_t = 0.8$ $\lambda_f = 1.0$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 1.0$)	$\lambda_t = 0.2$ $\lambda_f = 1.0$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 1.0$)	$\lambda_t = 0.2$ $\lambda_f = 1.0$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 1.0$)	$\lambda_t = 0.0$ $\lambda_f = 1.0$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 1.0$)	$\lambda_t = 0.0$ $\lambda_f = 1.0$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 1.0$)
50	$\lambda_t = 1.0$ $\lambda_f = 0.8$ ($\lambda_t = 1.0$) ($\lambda_f = 0.4$)	$\lambda_t = 0.8$ $\lambda_f = 0.8$ ($\lambda_t = 0.6$) ($\lambda_f = 0.4$)	$\lambda_t = 0.2$ $\lambda_f = 0.8$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 0.6$)	$\lambda_t = 0.2$ $\lambda_f = 0.8$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 0.6$)	$\lambda_t = 0.0$ $\lambda_f = 0.8$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 0.6$)	$\lambda_t = 0.0$ $\lambda_f = 0.8$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 0.6$)
100	$\lambda_t = 1.0$ $\lambda_f = 0.4$ ($\lambda_t = 1.0$) ($\lambda_f = 0.4$)	$\lambda_t = 0.8$ $\lambda_f = 0.4$ ($\lambda_t = 0.6$) ($\lambda_f = 0.2$)	$\lambda_t = 0.4$ $\lambda_f = 0.4$ ($\lambda_t = 0.2$) ($\lambda_f = 0.2$)	$\lambda_t = 0.2$ $\lambda_f = 0.4$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 0.2$)	$\lambda_t = 0.0$ $\lambda_f = 0.6$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 0.2$)	$\lambda_t = 0.0$ $\lambda_f = 0.6$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 0.2$)
150	$\lambda_t = 1.0$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 1.0$) ($\lambda_f = 0.2$)	$\lambda_t = 1.0$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.8$) ($\lambda_f = 0.0$)	$\lambda_t = 0.6$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.2$) ($\lambda_f = 0.2$)	$\lambda_t = 0.2$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.2$) ($\lambda_f = 0.2$)	$\lambda_t = 0.2$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 0.2$)	$\lambda_t = 0.0$ $\lambda_f = 0.4$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 0.2$)
200	$\lambda_t = 1.0$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 1.0$) ($\lambda_f = 0.0$)	$\lambda_t = 0.8$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.8$) ($\lambda_f = 0.0$)	$\lambda_t = 0.6$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.4$) ($\lambda_f = 0.0$)	$\lambda_t = 0.2$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.2$) ($\lambda_f = 0.2$)	$\lambda_t = 0.2$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.2$) ($\lambda_f = 0.2$)	$\lambda_t = 0.0$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 0.0$)
250	$\lambda_t = 1.0$ $\lambda_f = 0.0$ ($\lambda_t = 1.0$) ($\lambda_f = 0.0$)	$\lambda_t = 1.0$ $\lambda_f = 0.0$ ($\lambda_t = 1.0$) ($\lambda_f = 0.0$)	$\lambda_t = 0.6$ $\lambda_f = 0.0$ ($\lambda_t = 0.4$) ($\lambda_f = 0.0$)	$\lambda_t = 0.4$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.2$) ($\lambda_f = 0.0$)	$\lambda_t = 0.2$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.2$) ($\lambda_f = 0.0$)	$\lambda_t = 0.0$ $\lambda_f = 0.2$ ($\lambda_t = 0.0$) ($\lambda_f = 0.0$)

Resultados de la simulación:

La figura 1 muestra el BER del método propuesto cuando la máxima frecuencia Doppler es 100 Hz y la dispersión de retardo es 0.4 μ s, Varios factores de peso se usaron. Se muestra además el resultado asumiendo estimación de canal ideal para indicar la exactitud de la estimación de canal. En la figura 1 se puede observar que el factor de peso altera significativamente los resultados y existe un conjunto de factores de peso óptimos.

Enseguida se clarifica la relación entre dispersión de retardo, σ_s y el factor de peso para el dominio de la frecuencia f_f ; la figura 1 muestra el funcionamiento de BER contra la σ_s para varios valores de λ_f ; $E_b/N_0 = 10 \text{ dB}$. La máxima frecuencia Doppler es 200 Hz y el factor de peso en el dominio de la frecuencia λ_f esta fijo a 0.2. La figura

2 muestra que el BER mejora cuando el factor λ_f se incrementa si la dispersión de retardo es pequeña. Lo contrario ocurre cuando la dispersión es grande. Lo mismo puede ser concluido en lo que respecta a la relación entre λ y f_D . El BER mejora cuando el factor λ_f se incrementa si la máxima frecuencia Doppler es pequeña. Lo contrario ocurre cuando la frecuencia Doppler es grande.

El método bidimensional se lleva a cabo con los siguientes simples pasos: Primero, se genera una tabla que lista los óptimos factores de peso de acuerdo a f_D y σ_s . Enseguida, Se selecciona el valor de los factores de peso óptimo de acuerdo a f_D y σ_s y medido por la MS. Esto es simple ya que el MS sólo requiere de la tabla para seleccionar los valores óptimos. Los factores de peso óptimo se obtienen a

través de simulaciones de computadora. La tabla 1 muestra los factores de peso para E_b/N_0 de 10 y 20 dB. Cuando se quiera un valor intermedio de E_b/N_0 se hace una interpolación entre los valores de la tabla 1. La separación entre los factores de peso es de 0.2 es suficiente para el método propuesto.

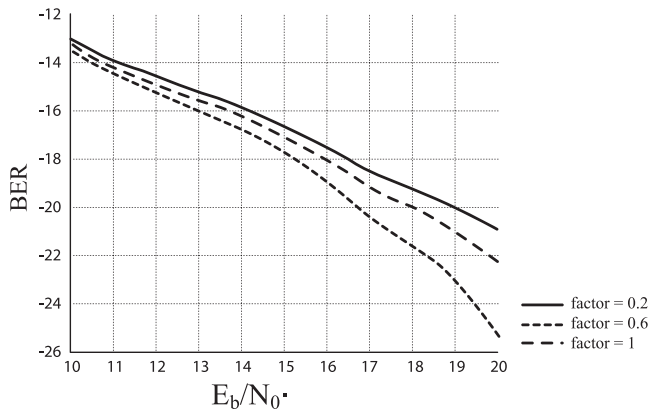


Figura 1. BER para el método propuesto ($f_D=100$ Hz, $\tau_s=0.4$ μ s)

Finalmente, se compara el funcionamiento del método propuesto con otros métodos. Se pone la máxima frecuencia Doppler a 0, 100 y 200 Hz y la dispersión de retardo de 0 a 0.4 μ s. Las figuras 2 y 3 muestran el BER; (1) el método propuesto, (2) el método bidimensional sin la respuesta al impulso y (3) el método de respuesta al impulso sin promediar en el dominio del tiempo con factores de peso. En el método (3), el promedio con pesos en el dominio del tiempo es usado sólo después de aplicar el método de respuesta al impulso. Los factores de peso de los métodos (1) al (3) son optimizados. El método (2) no incluye el método de respuesta al impulso. Cuando la máxima frecuencia Doppler y la dispersión de retardo son pequeñas, el BER es idéntico al del método (1). Esto es así porque la exactitud de la estimación de canal es alta aun cuando el método de respuesta al impulso no se use. Por otro lado, cuando la máxima frecuencia Doppler y la dispersión de retardo son grandes, la exactitud

de la estimación de canal es tan baja que el BER es menor que si se usara el método (1). El método (3) aplica el promedio en una sola dimensión en el dominio del tiempo en combinación con el método de respuesta al impulso. Cuando la máxima frecuencia Doppler es pequeña, el promedio en el dominio del tiempo tiene un impacto significativo sobre la exactitud de la estimación de canal. Sin embargo, cuando la máxima frecuencia Doppler es alta, el promedio en el dominio del tiempo no funciona bien y sólo la respuesta al impulso es efectiva.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se propone un método de estimación de canal, una combinación del método bidimensional y un método de respuesta al impulso. El símbolo bidimensional se le agrega un factor de peso considerando la correlación del desvanecimiento en ambos dominios. El método de estimación basado en la respuesta al impulso mejora la exactitud de la estimación del canal utilizando la naturaleza de la respuesta al impulso.

Se evaluaron primero los factores de peso optimizados para combinaciones de un rango de valores de máxima frecuencia Doppler y dispersión de frecuencia, considerando los efectos de los métodos bidimensional y de respuesta al impulso. Se evaluó el BER del método propuesto y se comparó con otros métodos. Comparado con el método bidimensional sin incluir el método de respuesta al impulso, el método propuesto es 0.6 dB mejor cuando la máxima frecuencia Doppler es 100 Hz y la dispersión de retardo es 0.4 μ s. También, comparado con el método de respuesta al impulso con filtrado en el dominio del tiempo, el método propuesto ofrece una ganancia de 0.4 dB cuando la máxima frecuencia Doppler es 200 Hz y la dispersión de retardo es 0.4 μ s.

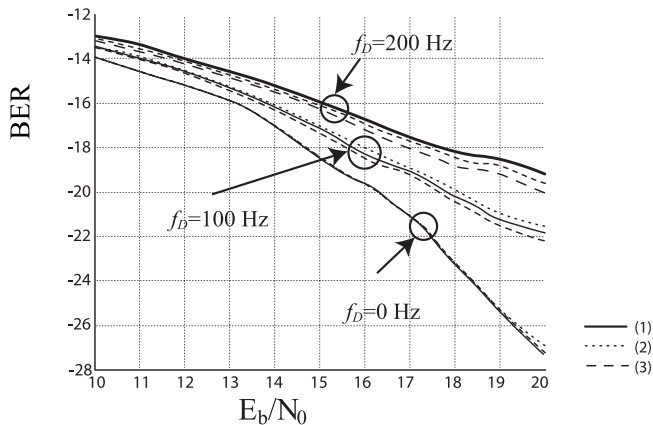


Figura 2. Comparación de BER ($\sigma_s=0.0 \mu s$)

REFERENCIAS

- [1] N. Yee, J.-P. Linnartz, y G. Fettweis. "Multicarrier CDMA in indoor wireless radio networks". *Proc. IEEE PIMRC'93*, Sept. 1993, pp. 109-113.
- [2] K. Fazel y L. Papke. "On the performance of convolutionally-coded CDMA/OFDM for mobile communication system". *Proc. IEEE PIMRC'93*, Sept. 1993, pp. 468-472.
- [3] A. Chouly, A. Brajal, y S. Jourdan. "Orthogonal multicarrier techniques applied to direct sequence spread spectrum CDMA systems". *Proc. IEEE GLOBECOM'93*, Nov. 1993, pp. 1723-1728.
- [4] S. Hara y R. Prasad. "Design and performance of multicarrier CDMA system in frequency-selective rayleigh fading channels". *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, no. 9, pp. 1584-1595, Sept. 1999.
- [5] A. Matsumoto, K. Miyoshi, M. Uesugi, and O. Kato. "A study on time domain spreading for OFCDM". *Proc. WPMC'02*, pp. 725-728, Oct. 2002.

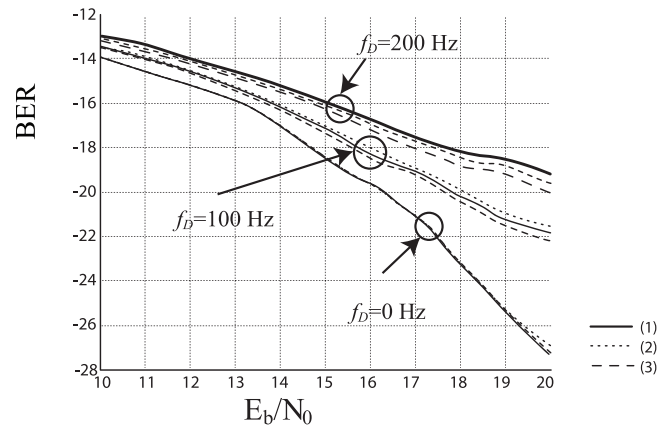


Figura 3. Comparación de BER ($\sigma_s=0.4 \mu s$)

- [6] A. Nagate, H. Masui, y T. Fujii. "A study on channel estimation methods for MC-CDMA systems". *Proc. VTC'03*, Spring, pp. 2101-2105, Apr. 2003.
- [7] J. J. van de Beek, O. Edfors, M. Sandell, S. K. Wilson, P. O. Borjesson. "On channel estimation in OFDM systems". *Proc. VTC'95*, vol. 2, pp. 815-819, Sept. 1995.
- [8] O. Edfors, M. Sandell, J. J. van de Beek, S. K. Wilson, P. O. Borjesson. "OFDM channel estimation by singular value decomposition". *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 7, pp. 931-939, July 1998.
- [9] T. Onizawa, M. Mizoguchi, and M. Morikura. "A novel channel estimation scheme employing adaptive selection of frequency-domain filters for OFDM systems". *IEICE Trans. Commun.*, E82-B, no. 12, Dec. 1999.
- [10] T. S. Rappaport. *Wireless Communications*. Pearson Education, 1996.
- [11] T. Dateki, D. Ogawa, and H. Furukawa. "New OFDM channel estimation method by adding a virtual channel frequency response". *Proc. VTC2006 Fall*, Sept. 2006.

■ ARTÍCULO DE REVISIÓN

Estudio de la radiación solar incidente en la región de Ciudad Juárez

Ricardo Enrique Pérez Blanco, Jenaro Carlos Paz Gutiérrez, Jesús Rodarte Dávila

RESUMEN

Actualmente los combustibles que se utilizan para la generación de energía eléctrica son cada vez más escasos, sus precios son altos y son muy contaminantes. Se buscan otras formas no convencionales para generar energía eléctrica, como las celdas solares. Pero en ellas no se especifica cómo debe orientarse debido a la región. Este trabajo presenta un estudio de la energía fotovoltaica incidente en la región de Ciudad Juárez. Los resultados obtenidos se comparan con una base de datos que contiene la información de la radiación solar incidente sobre la estación meteorológica 23044 de El Paso, Texas.

Palabras claves: Celda solar, Energía fotovoltaica, Bases de datos.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día se considera que el petróleo, el gas natural y el carbón mineral son los principales combustibles para la generación de energía eléctrica; pero estos combustibles son limitados, altamente contaminantes y sus precios son cada día más altos. Por eso es necesario buscar otras alternativas para generar energía eléctrica. Algunas de las acciones y objetivos contemplados en la Estrategia Nacional del Cambio Climático (SEMARNAT, 2007), en el Programa Sectorial de Energía (SENER, 2007) y la Ley de Equilibrio Ecológico y Protección al Am-

biente del Estado de Chihuahua (LEEPAEC, 2005) son generar energía limpia utilizando fuentes no convencionales como son la velocidad del viento y la radiación solar.

En su paso a través de la atmósfera, parte de la radiación solar es atenuada por dispersión y otra parte por absorción. La radiación que es dispersada por la atmósfera se conoce como radiación difusa. A la radiación que llega a la superficie de la tierra sin haber sufrido cambio en su trayectoria lineal desde el disco solar se llama radiación directa. Conocer el flujo de la radiación solar directa y difusa es importante para el análisis y diseño de algunos

riperez@uacj.mx, jpaiez@uacj.mx

sistemas solares. Por ejemplo, el valor de la radiación directa normal es necesario para calcular la radiación solar sobre superficies inclinadas, así como para establecer el desempeño de colectores concentradores (Paz, 2006 Vol. 2; Estrada et al, 2005) o para alguna aplicación en especial (Pérez et al, 2006). El flujo de energía sobre una superficie determinada depende no sólo de la irradiancia que exista, sino también de la orientación que tenga la superficie en cuestión respecto de la dirección de propagación de la radiación. La irradiancia será máxima sobre un plano que esté en posición normal a la dirección de propagación de la radiación. En cambio, será mínima si el plano es paralelo a la radiación (Pérez et al, 2008). Como región de estudio en este trabajo, se considerará la zona geográfica que ocupa el Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. En esta región de estudio, se registran incidencias solares con un factor anual de 6-7 kWh/

m²/día (Sandia Nacional Lab), (Paz, 2006 Vol. 1), las cuales están dentro de las incidencias más altas a nivel nacional, tal como se muestra en la figura 1. Además de ser un lugar con una incidencia solar alta, también es un lugar con un porcentaje bajo de días nublados al año. Sin embargo, en muchas aplicaciones prácticas, no basta con calcular la radiación teórica que incide sobre un lugar o sobre un equipo solar determinado. Es necesario realizar mediciones, para tener los valores efectivos de energía disponible o incidente sobre un colector en esa determinada región.

En este trabajo se presenta un estudio de la energía fotovoltaica incidente en la región de Ciudad Juárez; para ello se utilizaron celdas solares con diferentes orientaciones y para diferentes días. Los resultados obtenidos se comparan con una base de datos que contiene la información de la radiación solar incidente sobre la estación meteorológica 23044 de El Paso, Texas.



Figura 1.- Incidencia solar para la República Mexicana. (SNL).

ANTECEDENTES

Desde hace tiempo en la UACJ se han venido desarrollando proyectos en materia de energías renovables, algunos de ellos son “Aplicación de la Energía Solar en el Sistema de Aire Acondicionado de un Automóvil” (Carbajal y Rentería, 2003), “Estudio de factibilidad para Calentar e Iluminar un edificio con celdas solares” (Camarena, 2005), “Celdas de Combustible: Una Fuente Alternativa de Energía Eléctrica” (Casas y Castillo, 2005), “Estudio de la Energía Fotovoltaica en Función de la Posición de las Celdas Solares” (Herrera y Cornejo, 2006) “Sistema Fotovoltaico con Energía de Respaldo de CFE aplicado en un Salón de Clases” (Terrones, 2007), “Seguidor y Cargador Solar, Utilizando un Sensor Inteligente Como Protección y Monitoreo de los Resultados” (Tamay y de Santiago, 2007); “Estudio de la Energía Fotovoltaica en Función del Comportamiento de la Posición de las Celdas Solares” (Pérez, 2008). También se han realizado estudios de la estimación solar en la zona, entre los que destacan las obras “Colectores Solares I” (Paz, 2006 Vol. 1), “Colectores Solares II” (Paz, 2006 Vol. 2), “Generación de imágenes para web con GDI+” (Paz, 2007). Todos los trabajos anteriores se han efectuado como respuesta a las necesidades surgidas de los problemas ocasionados por la contaminación del medio ambiente y buscando aprovechar los recursos energéticos renovables que posee Ciudad Juárez, Chihuahua.

DESARROLLO

Para medir la cantidad de radiación solar que llega al IIT, se usó una celda solar de silicio monocristalino de la marca ICP Global Technology. La cual tiene las siguientes características: una dimensión de 122 cm X 30.5cm X 3.5 cm; potencia de 15 watts; corriente de salida de 1,002 mAmps; voltaje a circuito abierto 15 volts. Las lecturas de la corriente se realizaron con un multímetro digital marca Fluye 187. Las lecturas se realizaron cada 30 minutos de manera manual sobre 3 celdas solares similares, las cuales se encontraban a un ángulo de

0, 30 y 60 ° respectivamente, con relación al horizonte. Se realizaron mediciones durante el periodo comprendido del 1 de Febrero al 30 de Mayo del 2008; cabe señalar que las mediciones no se realizaron todos los días, debido a que las condiciones del clima no eran favorables en ese momento (días nublados, demasiado viento, lluvia, etc.). Al inicio de cada día, las celdas solares se limpiaban con alcohol para eliminar algún rastro de polvo que pudiera afectar las mediciones.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La figura 2 muestra el comportamiento encontrado para las celdas solares con diferente orientación, las mediciones corresponden al 1 de Mayo. De esta figura se observa como la corriente se va incrementando con el transcurso del día, alcanza un máximo y después desciende al caer la tarde. Para el día 1 de Mayo la salida del sol fue a las 6:20 am y la puesta del sol fue a las 7:46 pm (Datos, 2008). Es decir, se tuvieron 13:26 horas de luz solar y el sol alcanzó el cenit a las 13:03 hrs. La normal de la celda solar colocada a un ángulo de 30°, estuvo directa al sol a las 10:50 am. Y para la celda solar colocada a un ángulo de 60°, fue a las 8:36 am. Sin embargo, las horas a las que se encontraron los valores más altos de corriente en nuestras mediciones fueron: Para 0° 13:00 pm, es decir se tuvo un error del 0.5 %; para 30° 11:30 am, se tuvo un error del 6.1 %; y para 60° 10:30 am, con un error del 18%. En los dos primeros casos el error es de un solo dígito y es bastante aceptable. Para el caso de la celda solar con 60° de inclinación, el error es alto. Es necesario hacer más mediciones para tratar de reducir el error.

En la figura 3 se observa que conforme se aumenta el ángulo de inclinación de la celda solar con respecto al horizonte (θ), su normal (N) queda alineada con el sol a tempranas horas de la mañana. Sin embargo, a pesar de lograr esta alineación la cantidad de radiación es menor que la que se alcanza a mediodía. También observamos en la figura 3 que hay un ángulo δ , este ángulo tiene que ver con la altura que tiene el sol sobre el horizonte,

para que la celda empiece a generar energía. Por debajo de este ángulo la luz que irradia el sol no es suficiente para generar alguna corriente significativa. También se realizaron mediciones para ver el comportamiento de la celda solar en función de la época del año y los resultados se presentan en la figura 4.

Las mediciones se presentan sólo para la celda solar con inclinación de 0° , esto debido a que es el ángulo que presenta la mayor cantidad de corriente para los tres ángulos. En esta figura se observa como la corriente va aumentando conforme se pasa del invierno a la primavera. Dado que las mediciones sólo se realizaron durante el periodo comprendido del 1 de febrero al 30 de mayo, se presentan resultados sólo hasta el 1 de mayo. Sin embargo, se espera que este comportamiento sea el mismo hasta el día 22 de junio que es cuando entra el verano. Después de ese día se espera que la corriente disminuya con el paso de los días. Hasta llegar al 22 de diciembre que es cuando empieza el invierno.

De la figura 4, también observamos que el pico máximo se desplaza de la mañana al mediodía. Esto se debe a que cuando el sol se mueve por la bóveda celeste va quedando cada vez más cerca de la normal de la celda solar (ver figura 5). En verano prácticamente esta sobre la celda y en invierno forma un cierto ángulo con respecto a la normal. Su variación es similar a la que se tiene cuando se varía el ángulo. Además, en verano es cuando se tiene la mayor cantidad de luz. Después se desplaza al otro lado hasta alcanzar el invierno, que es cuando se tienen los días más cortos y por lo tanto menos cantidad de luz solar.

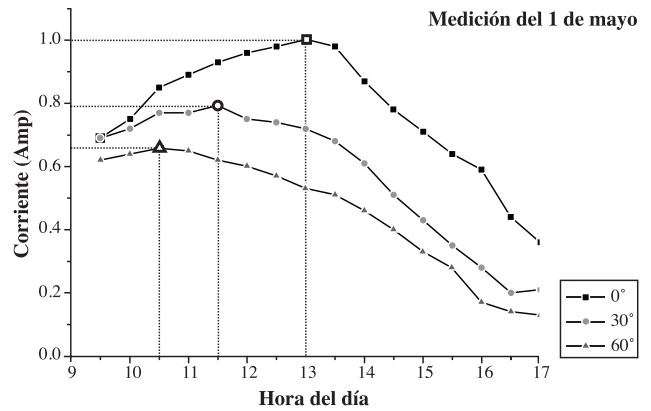


Figura 2.- Comportamiento de las celdas solares en función de la hora del día y de la inclinación con respecto al horizonte. El punto abierto muestra el máximo de la curva.

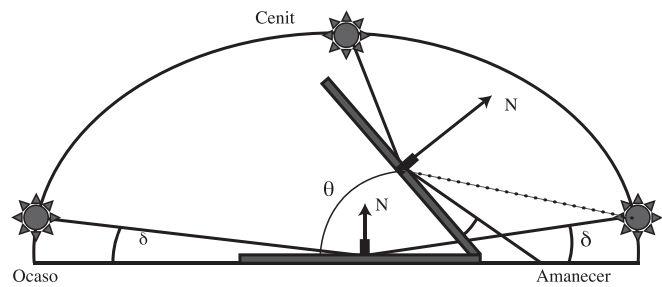


Figura 3.- Efecto de la radiación solar con respecto a la inclinación de las celdas solares.

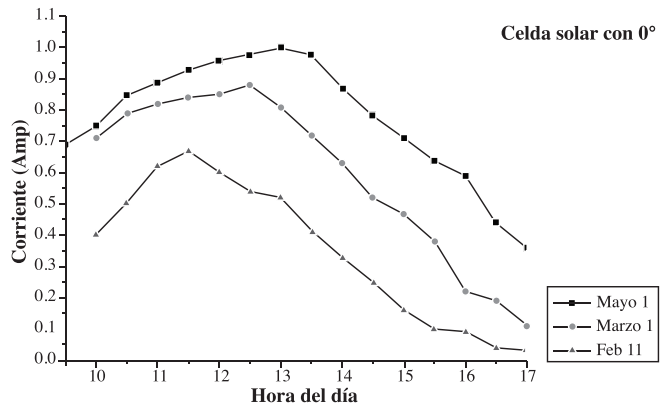


Figura 4.- Comportamiento de las celdas solares en función de la fecha y hora del día.

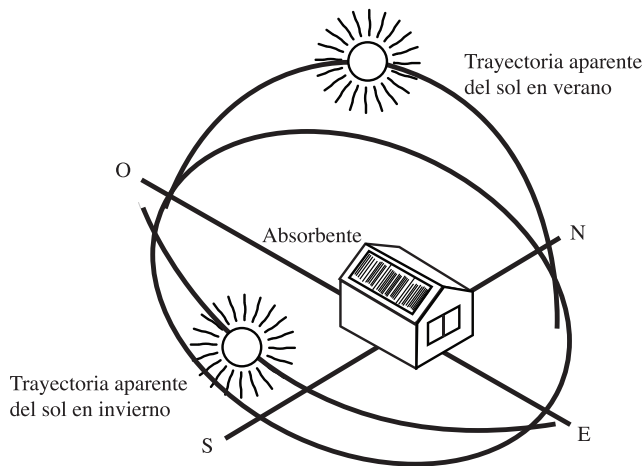


Figura 5.- Movimiento aparente del sol en la bóveda celeste en función de la época del año (Paz, 2006 Vol. 2).

La energía de la radiación solar que se recibe en una superficie determinada en un instante dado se le conoce como irradiancia y se mide en unidades de W/m^2 . Otro concepto importante es el de Insolación, éste corresponde a la integración de la irradiancia en un período determinado. En otras palabras es la energía radiante que incide en una superficie de área conocida en un intervalo de tiempo dado. La insolación es un parámetro clave en el diseño de sistemas solares. Los factores principales que afectan la insolación sobre una superficie captadora son las condiciones climáticas y el ángulo de la superficie captadora con respecto a la posición del sol. En lugares donde los días nublados son relativamente más frecuentes, la insolación promedio es menor. Cuando la latitud del lugar sobrepasa los 15, los días de invierno son apreciablemente más cortos que los días de verano. Esto resulta en una mayor insolación promedio en el verano. Por ejemplo, en las regiones lluviosas del sur de México, la insolación horizontal alcanza 4 kW-h/m^2 por día en el invierno, 5.2 kW-h/m^2 por día en el verano y 4.5 kW-h/m^2 por día como promedio anual. En las regiones áridas del norte de México, la insolación horizontal alcanza 5 kW-h/m^2 por día en el invierno, 8 kW-h/m^2 por día en el verano y 6.5 kW-h/m^2 por día como promedio anual (SNL, 2001). Para nuestro caso tomamos 7

kW-h/m^2 para el mes de mayo. En la figura 6, graficamos las lecturas máximas de la corriente en función de la hora del día y por ellos se hizo pasar una función Gaussiana, ya que es el comportamiento de una celda solar ideal. Se toma como el ancho de la irradiancia, la intersección entre la función y el valor de 0.5. Cabe señalar que la gráfica está normalizada con respecto al valor máximo de irradiancia. Este valor nos indica el comportamiento de nuestra celda solar y la zona de mayor captación de energía solar por parte de la celda que es de las 9:00 am a las 16:15 pm aproximadamente.

En un trabajo reciente (Paz, 2008), se tomaron los datos de la radiación solar que incide en una estación de trabajo que se encuentra en la vecina ciudad de El Paso, Tx y se presentaron de una forma visual. La figura 7 muestra el comportamiento de la irradiancia para el mes de mayo en dicha estación. De esta figura observamos que la intersección de la curva AVGLO con la lectura de 500 Wh/m^2 (la mitad de la escala), se alcanza para los valores aproximados de 8:45 y a las 16:15. Si se comparan estos resultados con los obtenidos en nuestra celda solar vemos que tenemos una diferencia del 3 % y de 0% respectivamente. Estos valores tan bajos nos indican que la toma de mediciones que se están realizando en nuestra localidad es confiable.

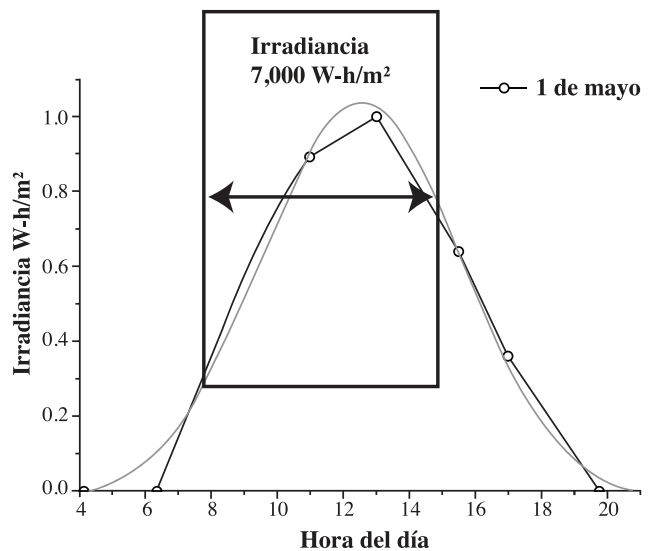


Figura 6.- Irradiancia de la celda solar del día 1 de Mayo.

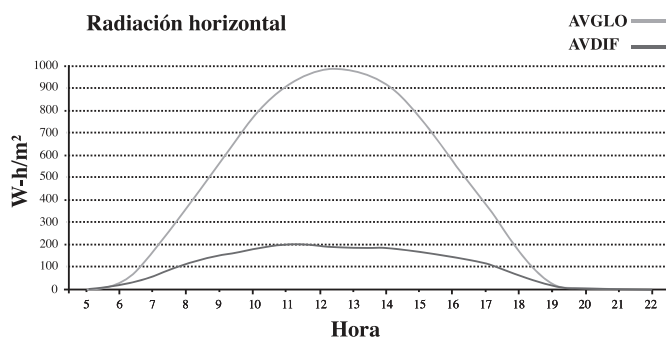


Figura 7.- Irradiancia solar para el mes de mayo.

Como conclusión, se realizó un estudio sobre tres celdas solares similares, en las cuales se varió el ángulo de inclinación. Este estudio se realizó en los primeros meses del año pasado y se encontró una dependencia de la corriente con respecto a la inclinación de las celdas. Siendo la de 0° , la que obtuvo una mayor corriente y la de 60° la que presentó una menor corriente eléctrica. En los resultados obtenidos, se tuvieron errores de solo un dígito en dos de ellas, lo cual nos da una gran confianza en las mediciones que se realizaron. También se efectuaron mediciones para ver el comportamiento de la celda solar en función de la época del año. Se tomaron sólo las lecturas de las celdas colocadas a un ángulo de 0° , esto por ser la que genera una mayor corriente eléctrica. Aquí se observó que conforme se acerca el verano, la corriente generada es cada vez mayor. Así como también, que el pico máximo de la corriente se obtiene cada vez a valores más altos de la hora del día. Con los datos obtenidos se calculó la cantidad de radiación solar para ese día en particular y se encontró el intervalo donde la celda solar generará siempre una corriente eléctrica. Estos valores encontrados, se compararon con una base de datos de una estación meteorológica de la ciudad de El Paso, Tx. Y la diferencia entre ellos es pequeña o nula. Este trabajo aún no está del todo concluido, como trabajo futuro se fabricará un seguidor solar que contenga un sistema electrónico que tome las lecturas de la corriente eléctrica de manera automática cada 3 ó 5 minutos, para que

con ello se tenga una curva más real y el error en las mediciones sea menor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Jefatura del Departamento de Eléctrica y Computación por todo el apoyo brindado para la realización de este trabajo; así como al Ing. Francisco Freyre, Jefe del Laboratorio de Computo Avanzado y al Sr. Moisés Huerta por su ayuda técnica.

BIBLIOGRAFÍA

- Camarena Murillo, Federico Luciano. *Estudio de Factibilidad para Calentar e Iluminar un Edificio con Celdas de Energía Solar*. Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2005.
- Carvajal, Francisco y Rentería, Sergio. *Aplicación de la Energía Solar en el Sistema de Aire Acondicionado de un automóvil*. Ciudad Juárez, Chihuahua, México 2003.
- Casas Maldonado, Yazdhell Ali y Castillo Cuevas, Emerardo. *Celdas de Combustible: Una Fuente Alternativa de Energía Eléctrica*. Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2005.
- Datos proporcionados por el Laboratorio de Climatología y Calidad del Aire de la UACJ. Proporcionados el 8 de Mayo de 2009.
- Estrada-Cajigal, V. y Almanza, R. (2005). *Irradiaciones Global, Directa y Difusa, en Superficies Horizontales e Inclinadas, así como Irradiación Directa Normal, en la República Mexicana*. Serie Investigación y Desarrollo. Universidad Autónoma de México. ISBN 970-32-2661-2.
- Herrera Pérez, César y Cornejo Carvajal, Ulises. *Estudio de la Energía Fotovoltaica en Función de la Posición de las Celdas Solares*. Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2006.
- LEEPAEC, *Ley de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Chihuahua*. 2005.

- Paz Gutiérrez, J., (2006). *Colectores Solares Planos*. Vol. 1. Tratamiento Teórico. 1ª edición. ISBN: 968-7845-78-3. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Paz Gutiérrez, J., (2006). *Colectores Solares Planos* Vol. 2. Construcción. 1ª edición. ISBN: 968-7845-79-1. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Paz, Gutiérrez J. (2007). Generación de imágenes para web con GDI+”, UACJ. ISBN: 978-968-7845-913. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Paz, Gutiérrez J. Pérez Blanco, R (2008). Sistema de Información WEB Sustentando en Objetos Gráficos. 3er Simposio Internacional de Sistemas Telemáticos y Organizaciones Inteligentes.
- Ponce Torres, Arturo y Rivera, Édgar Sauzamed, “Optimización y Aprovechamiento de Celdas Solares Mediante Espejos Automatizados”. A presentarse en Noviembre del 2008.
- Pérez Blanco, R.; Enríquez, Paz Gutiérrez, J; Muela, J.; Gándara Fernández, A. (2008). “Estudio de la Energía Fotovoltaica en Función del Comportamiento de la Posición de las Celdas Solares”. *Memorias de la Decimotercera Semana de Ingeniería*.
- Semarnat, Comisión Intersecretarial del Cambio Climático, México. CICC, 2007. Estrategia Nacional del Cambio Climático. ISBN 968-817-837-3. México. Disponible en: http://www.semarnat.gob.mx/queessearnat/politica_ambiental/cambioclimatico/Documents/enac/sintesis/sintesejecutiva/Estrat_nal_Sintesis%20español.pdf
- Sener, México. Programa Sectorial de Energía 2007-2012. Disponible en: <http://www.sener.gob.mx/webSener/res/0/Programa%20Sectorial%20de%20Energia%202007-2012.pdf>
- SNL, Sandia National Labs. Tomado de: <http://www.re.sandia.gov/sp/in/mr/solarmap1.pdf>, consultado el 3 de junio del 2008.
- SNL, Sandia National Labs, (2001). Guía para el Desarrollo de Proyectos de Bombeo de Agua con Energía Fotovoltaica, Vol. 1 Libro de Consulta. Southwest Technology Development Institute, New Mexico State University. Disponible en: <http://www.re.sandia.gov/wp/wpGuia/Images/guide1.pdf>
- Tamay Zapata, Israel y de Santiago Morales, Rafael. *Seguidor y Cargador Solar, Utilizando un Sensor Inteligente como Protección y Monitoreo de Resultados*. Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2007.
- Terrones Hidalgo, Jorge Alberto. *Sistema Fotovoltaico con Energía de Respaldo de CFE, Aplicado en el Alumbrado de un Salón de Clases*. Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2007.

■ ARTÍCULO DE REVISIÓN

Corrosión en dispositivos de enfriamiento automotriz

R. A. Saucedo-Acuña¹, E. G. Ordoñez-Casanova², L. A. Ramos², I. J. Salazar-Rodarte²

RESUMEN

El presente proyecto analiza la problemática de corrosión a corto y mediano plazo que se presentan en dos distintos tipos de radiadores de uso generalizado en la región. Mediante el análisis de la termodinámica, cinética y mecanismos de reacción que propician la corrosión y deterioro de los materiales empleados en estos dispositivos de enfriamiento automotriz, el presente trabajo busca prevenir y controlar los problemas que presentan en su desempeño los dispositivos manejados.

Palabras clave: Corrosión, deterioro, radiador automotriz.

INTRODUCCIÓN

Los problemas de corrosión y deterioro en el Estado se han acrecentando debido al intemperismo presentado, lo que ha puesto de manifiesto la necesidad de prevenir y controlar estos problemas tanto en los dispositivos empleados, como en los generados por la Industria. El sector automotriz ha sido testigo de esta creciente problemática, ya que las piezas están presentando este tipo de problemas, cuyo origen va desde el empleo de empaques plastificados cuya permeabilidad permite el acceso de humedad a los dispositivos almacenados, como la falta o mala selección de un inhibidor. La raíz de esta problemática radica en el empleo de téc-

nicas inhibidoras con resultados satisfactorios en otras regiones, dejando de lado que el entorno local cuenta con un clima extremo con una diferencia de temperatura de más de 10°C entre el día y la noche, a lo que hay que agregar que el agua es rica en sales. Particularmente los dispositivos de enfriamiento, tales como los radiadores de flujo transversal empleados en la región, han presentado fallas continuas debido a problemas de corrosión y deterioro durante los primeros tres meses de uso. Considerando que el dispositivo fue colocado de manera apropiada y que el usuario cumple con las especificaciones de uso recomendadas por el fabricante, se propusieron una serie de pruebas y análisis a las unidades dañadas, así como a dispositivos

¹ Actualmente adscrita al Instituto de Ciencias Biomédicas. Anillo Envolvente Pronaf y Estocolmo s/n Ciudad Juárez, Chih. rosauced@uacj.mx
² Instituto de Ingeniería y Tecnología. Av. del Charro 450 Ciudad Juárez, Chih. eordonez@uacj.mx

nuevos, evaluando así la cinética y velocidad de reacción de los productos de corrosión localizados y estableciendo el mecanismo de corrosión y deterioro de dichos radiadores automotrices.

El radiador es un permutador térmico que expone un gran volumen de refrigerante caliente a un gran volumen de aire de enfriamiento.

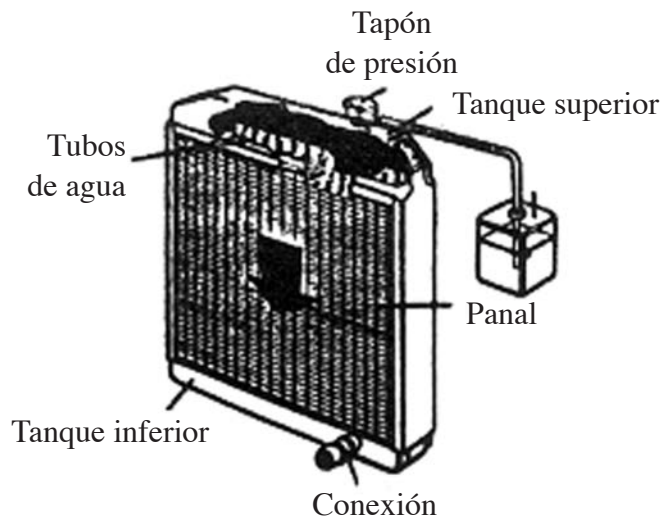


Figura 1. Esquema general de un radiador [1].

Considerando el tipo de flujo los radiadores se clasifican en dos tipos básicos: flujo descendente y los de flujo transversal. En los radiadores de circulación descendente el agua entra por la parte superior y baja después por una serie de pequeños conductos. En cambio para los radiadores de circulación *transversal* el agua caliente entra por la izquierda y circula por los dos conductos hasta el tanque receptor, a la derecha del tapón y el enfriador de la transmisión automática está en el extremo frío del radiador.

Ahora bien, la refrigeración es el conjunto de elementos, que tienen como misión eliminar el exceso de calor acumulado en el motor, debido a las altas temperaturas, que alcanza con las explosiones y llevarlo a través del medio empleado, al exterior. La temperatura normal de funcionamiento oscila entre los 75° y los 90°. En el caso de los vehículos automotrices el exceso de calor produciría dilatación y como consecuencia engarrotaría las piezas

móviles. Por otro lado, estropearía la capa aceitosa del engrase, por lo que al no ser adecuado el engrase del motor, sufrirían un serio daño las piezas vitales del mismo.

En el sistema de refrigeración además el anti-congelante, el aire sigue siendo un elemento principal (figura 2).

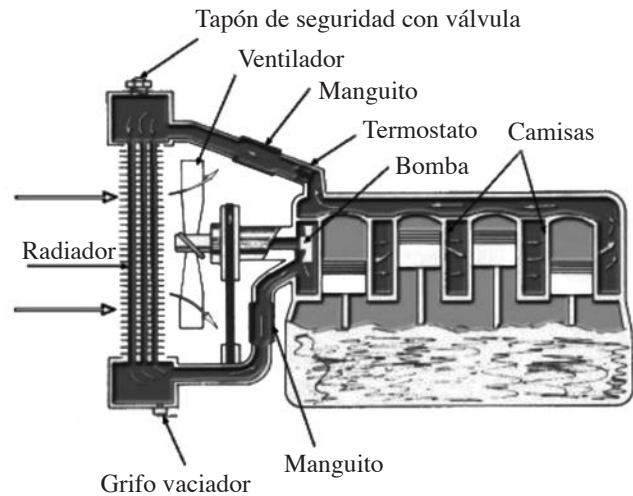


Figura 2. Esquema interno general de un radiador [2].

En general un radiador es un depósito compuesto por láminas por donde circula el agua. Tiene un tapón por donde se rellena y dos comunicaciones con el bloque, una para mandarle agua y otra para recibirla. Hay varios tipos de radiador, los más comunes, son: tubulares, de láminas de agua, y de panel. En el presente trabajo se analiza la falla derivada por problemas de corrosión en radiadores de panel. En este tipo de radiador, los conductos que comunican con el bloque son de goma dura, llamados manguitos y sujetos por abrazaderas.

En tiempo frío, desde que el arranque del motor hasta que alcanza la temperatura ideal de los 75° ó 90°, conviene que no circule agua fría del radiador al bloque, por lo que se intercala, a la salida del bloque un termostato, de esta forma el agua no circula hasta que no alcance la temperatura adecuada para el motor [2,3].

Por otro lado considerando la temperatura del motor, ésta es diferente en cada uno de ellos y para

cada circunstancia. Depende básicamente de: la Presión inicial (atmosférica, o la suministrada por el compresor), la temperatura inicial (a la entrada del cilindro), la relación de compresión, y la cantidad de combustible y calidad del mismo. Por ejemplo en un motor tipo diesel la diferencia de temperatura de entrada y salida es mayor, de ahí que el rendimiento térmico (menor consumo) sea mejor en el diesel (los datos son de un diesel rápido). [3]

En el tablero del auto el sensor de temperatura muestra en realidad la temperatura del líquido refrigerante del motor en la culata y muy cerca del último cilindro, en este punto es donde el refrigerante ha alcanzado su mayor temperatura debido a que ha refrigerado todos los cilindros. Por tal motivo se coloca allí un sensor que envía al indicador del panel una señal eléctrica que es registrada por la aguja como un valor de temperatura.

Casi todos los sistemas de medición de temperatura de los automóviles actuales usan como sensor un termistor, y como indicador, un instrumento que mide el valor de la resistencia del termistor con la escala graduada en grados de temperatura. Como el automóvil está constantemente sometido a aceleraciones y desaceleraciones, fuerzas laterales en las curvas y movimientos oscilatorios verticales con las irregularidades del camino, este indicador debe tener un mecanismo de movimiento de la aguja a prueba de estas perturbaciones, de manera que este constante movimiento del coche no se transmita a la aguja indicadora, y así mostrar una indicación estable.

Una vez analizados los conceptos básicos referentes al dispositivo a evaluar, se procede a continuación a enlistar la metodología aplicada, evaluar los resultados y presentar las conclusiones.

METODOLOGÍA

1. Evaluación del proceso de colocación y retiro de las piezas.
2. Análisis visual de las piezas dañadas.
3. Análisis morfológico y estructural de los productos de corrosión.

4. Análisis morfológico y estructural del material original de la pieza.
5. Análisis de variables.
6. Pruebas de corrosión a piezas nuevas.
7. Cálculo de dinámica y cinética de reacción.
8. Establecimiento de mecanismo de reacción.

RESULTADOS

Se analizan dos tipos de radiadores de panel que presentan fallas prematuras. Ambos tipos de radiadores se elaboran con los mismos materiales, por lo que su única diferencia es el tamaño de la pieza y el diseño del tubo interior de recirculación (A y B).

En todos los casos se localizan dos tipos de capa de productos de corrosión diferentes:

Una capa externa delgada de color gris opaco en el cuerpo del radiador.

Una capa gruesa de color marrón en el interior del radiador y en la zona externa aledaña al contacto del emparrillado con la zona de conexión.

C. Oliet et al. / Applied Thermal Engineering 27 (2007) 2033-2043

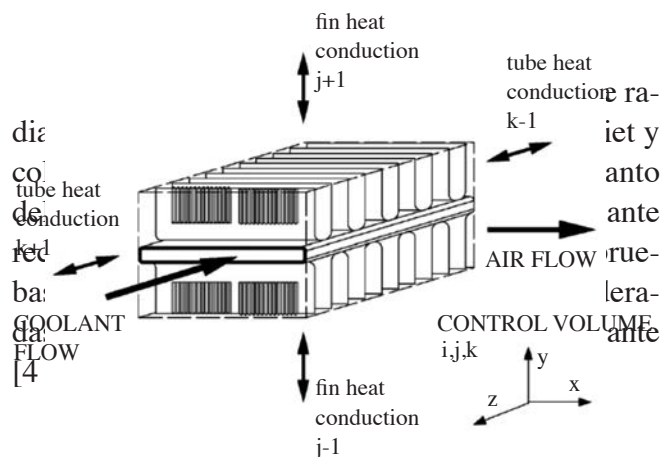


Figura 3. Esquema de flujos considerados por Oliet y colaboradores [4].

Por otro lado se analizaron las secciones en las que se había localizado la falla del material y el mayor cúmulo de productos de corrosión en los radiadores deteriorados comparados con los resultados publicados por Rafael y colaboradores. Ver figuras 4 y 5. A diferencia de Rafael también se ob-

serva una falla en la zona de emparrillado central de los radiadores.

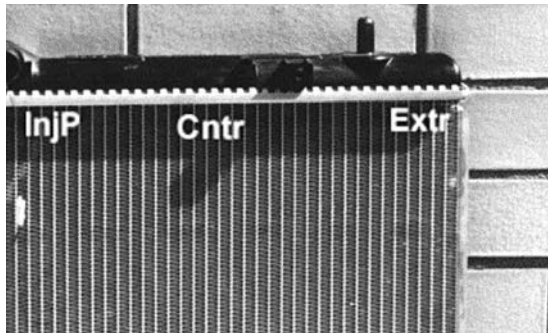


Figura 4. Imagen de la cabeza del radiador. Tres puntos de medición: Injp: punto de inyección, Cntr: centro de la zona, y Extr: extremo del emparrillado cercano a la zona de intercambio [5].

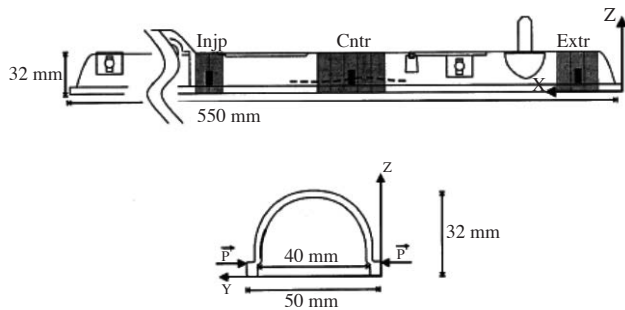


Figura 5. Esquema de la zona de intercambio del radiador [5].

El autor de este ensayo señala como zona crítica la zona central del emparrillado con la zona de intercambio, observándose en los radiadores analizados que la zona crítica se localiza en la misma región debido al acumulamiento y arrastre de productos de corrosión, pero mostrando también un severo daño hacia la zona de inyección que es la zona que alcanza mayor temperatura en las piezas dañadas recibidas. Ver figura 6.



Figura 6. Daño sufrido en el cuerpo del radiador o emparrillado A.



Figura 7. Vista transversal, frontal y posterior de la sección central del radiador A.

Como se aprecia en la figuras 6 y 7 la capa de productos de corrosión principalmente se conforma de óxido de hierro con una mínima cantidad de óxido de níquel, información corroborada por análisis químico cualitativo en el microscopio de barrido y difracción de rayos X.

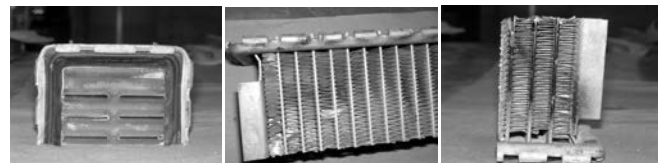


Figura 8. Vista transversal, frontal y posterior de la sección central del radiador B.

En el radiador tipo B el producto de corrosión está principalmente constituido por hidróxido y óxido de hierro con trazas de óxido de níquel (figura 8). Este modelo de radiador a diferencia del tipo A, se emplea en autos más pequeños.

La cantidad de óxido de hierro acumulada en el interior del radiador B obstruyó el paso a través del mismo, motivo que generó la falla del dispositivo. (Figura 9)



Figura 9. Imagen de la zona central de emparrillado del radiador tipo B en la que se puede apreciar el taponamiento del mismo debido a sales y óxido de hierro.

La figura 10 compara la zona de intercambio del radiador tipo A (izquierda) y el tipo B (derecha), el diseño de esta zona es la única diferencia en el diseño de ambos radiadores. Como se puede apreciar sólo en el radiador A zonas se encontró depositado óxido de hierro.



Figura 10. Imagen comparativa de la zona de intercambio del radiador A(izquierda) y radiador B(derecha).

Para establecer la cinética de reacción se realizaron pruebas a las piezas nuevas de ambos radiadores, cortando secciones de 5 x 5 cm de emparrillado tal como muestra la figura 11 y 12.

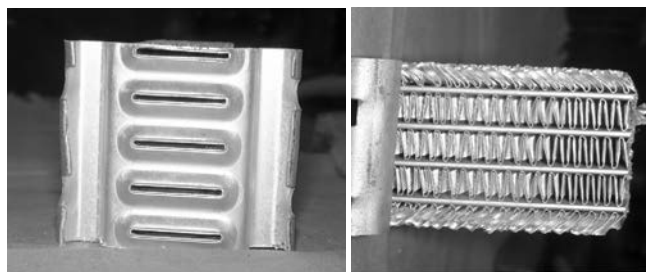


Figura 11. Cubos analizados para evaluar el daño seccional en radiadores nuevos.

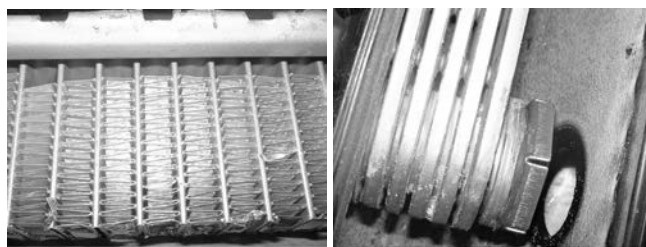


Figura 12. Sección de emparrillado y zona de intercambio en un radiador tipo B nuevo.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El radiador A presenta una mayor cantidad de producto de corrosión debido a que se emplea en vehículos automotrices con una temperatura de motor mayor, razón por la cual la fuerza impulsora para la formación de dicho producto es mayor. El diseño del radiador, así como su instalación y uso son los adecuados, razón por la cual el dispositivo no se encuentra anodizado, como se corroboró al estar aún instalado en la unidad automotriz. Las pruebas aceleradas y las hechas durante meses a los radiadores nuevos variando flujos de aire y anticongelante, tal y como se esperaba no muestran formación alguna de óxido de hierro y apenas forman una ligera capa gris opaca demasiado delgada e inconsistente para analizar por difracción de rayos X. Por esta razón, considerando sólo en información bibliográfica reportada para la formación de productos de corrosión del tipo de material empleado se concluye se trata de una incipiente formación de óxido de aluminio en la parte externa del radiador. Por otro lado, la parte interna del emparrillado y zona de intercambio permanece inalterable en ambos tipos de radiadores.

El óxido de hierro no proviene del material del cual está elaborado el radiador, el cual se corroboró actúa como cátodo en el sistema de refrigeración. Cualquier pieza del automotor en cambio está realizando la función de ánodo. Este fenómeno se conoce como par galvánico, el cual se presenta cuando dos partes distintas de una superficie metálica o de dos metales distintos, que en contacto con un *electrolito* (en este caso el anticongelante), tienen una *diferencia de potencial*, por lo que el *ánodo* (potencial más negativo) se corroe mientras que el *cátodo* (potencial menos negativo) no sufre corrosión. El flujo de corriente es del ánodo al cátodo (en el electrolito por medio de iones y el metal por medio de electrones). Todo lo anterior aunado a que la temperatura de la combustión del motor a gasolina puede estar entre 450 y 500°C, superando los 600° a gas comprimido o a diesel

Considerando que en ambos tipos de radiadores se empleó el anticongelante adecuado en la mezcla apropiada, y que se venía realizando el mantenimiento preventivo recomendado, se confirma entonces el problema de electrólisis ya mencionado al localizar puntos negros en el emparrillado del radiador.

Es un hecho conocido que existen 2 modos diferentes por los que la corrosión puede hacer fallar el sistema de refrigeración: la oxidación y eliminación de metal, y la formación de producto que bloquea el paso del líquido [4, 5, 8]. En los radiadores la perforación no es tan común como la gran corrosión que puede ocurrir porque la corrosión generalmente tapa los agujeros que se crean.

Por otro lado, no se debe dejar de lado que en nuestra región el agua tiende a formar precipitados de calcio o carbonato de magnesio, esta capa tapa las tuberías. Agua con altos niveles de sodio, cloruro y otros iones aumentará la conductividad del agua así promoviendo la corrosión. También los siguientes pueden acelerar corrosión:

CONCLUSIONES

- El dispositivo analizado actúa como cátodo en el sistema analizado.
- La falla del dispositivo de enfriamiento se debe al taponamiento del mismo por precipitados de sales, así como por una capa de óxido de hierro proveniente del ánodo.
- La gran cantidad de producto de corrosión en un estado inicial se debe a una formación exponencial del mismo, comportamiento que después desacelera su crecimiento pero que no se detiene.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. http://www.widman.biz/Boletines/2004/Boletin_11/boletin_11.html
2. <http://www.almuro.net/sitios/Mecanica/refrigeracion.asp>
3. http://www.arpem.com/tecnica/temperaturas/temperaturas_p.html
4. C. Oliet, A. Oliva *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 2033–2043
5. Seyyed M. Hasheminejad, *International Journal of Solids and Structures* 45 (2008) 24–47
6. Rafael Schouwenaars, *Composites: Part a* 33 (2002) 551–558
7. Tae-Won Lee, *Electric Power Systems Research* 77 (2007) 804–812
8. A. Witry, *Applied Thermal Engineering* 25 (2005) 1207–1218
9. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3>

■ ARTÍCULO DE REVISIÓN

Metodología para diseñar un compresor de imágenes con pérdidas utilizando wavelets

Osslan Osiris Vergara Villegas, Humberto de Jesús Ochoa Domínguez,
Vianey Guadalupe Cruz Sánchez y Leticia Ortega Máynez

RESUMEN

En el presente artículo se muestra la metodología para el diseño de un compresor de imágenes con la transformada discreta wavelet. El diseño de un compresor de imágenes con pérdidas no es fácil, dado que implica la toma de decisiones muy importantes para asegurar la calidad de la imagen reconstruida. Entre las decisiones más importantes se encuentra la selección de la familia wavelet, la extensión de la imagen, y el número de niveles de descomposición. Para la construcción del compresor se ofrece una explicación de las tres etapas para comprimir con el modelo propuesto (transformada wavelet, cuantificación y codificación por entropía) y las dos etapas de descompresión (decodificación por entropía y transformada wavelet inversa). Por último, se muestran los resultados de la evaluación de la calidad de las imágenes reconstruidas con cinco familias wavelet: Haar, Daubechies 4, Coiflet 4, Symlet 4 y Biortogonal 2.2.

Palabras clave: Compresión de imágenes, Multiresolución, Haar, Daubechies, Coiflet, Symlet, Wavelet Biortogonal.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años la transformada wavelet ha sido muy utilizada en diferentes tareas para el procesamiento de imágenes y señales siendo una de las más importantes la compresión de imágenes [1]. En la literatura se pueden encontrar una gran cantidad de trabajos que presentan sistemas de

compresión de imágenes utilizando la transformada wavelet [2], [3], [4]. El principal problema en dichos trabajos es que no presentan detalles acerca del diseño del sistema de compresión.

La compresión de imágenes puede realizarse con o sin pérdida de información. El presente artículo se enfoca en un sistema de compresión wavelet con pérdidas que consta de tres etapas principales

overgara@uacj.mx, hochoa@uacj.mx, vianey.cruz@uacj.mx, lortega@uacj.mx

[5]: transformación wavelet, cuantificación y codificación por entropía. La descompresión tiene dos etapas: la decodificación por entropía y la transformada wavelet inversa. En el caso de la compresión sin pérdidas se omite el proceso de cuantificación y la imagen reconstruida es una copia fiel de la original. Para el caso con pérdidas la imagen tiene un decremento en la calidad de acuerdo a las necesidades del usuario.

La figura 1 muestra el esquema general del proceso de compresión de imágenes con pérdidas con wavelets.

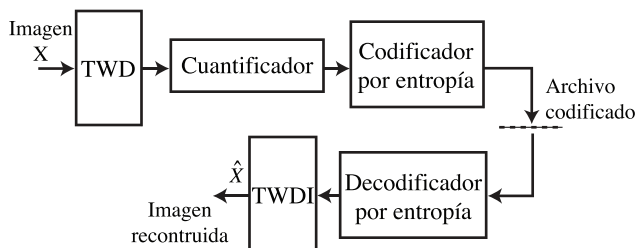


Fig. 1. Estructura de un compresor de imágenes con wavelets.

Dado lo anterior, resulta fácil pensar que el proceso de diseño de un compresor de imágenes con wavelets es sencillo lo cual no es del todo cierto. Las siguientes secciones muestran el diseño de un compresor con pérdidas para cinco familias wavelet (ortogonales y biortogonales).

COMPRESIÓN DE IMÁGENES

El objetivo de la compresión de imágenes es reducir la cantidad de bits necesaria para representar cierta cantidad de información cuya percepción final se adapte a los fines que se persiguen desde el punto de vista de la distorsión [6].

La Transformada Wavelet Discreta (TWD)

Una transformación tiene dos objetivos: a) concentrar la mayor cantidad de energía de la señal en un número pequeño de coeficientes y b) obtener como resultado los coeficientes decorrelacionados [7].

La Transformada Wavelet Discreta (TWD) permite descomponer jerárquicamente una señal de entrada en una serie de señales de referencia de menor resolución y sus señales de detalle asociadas [8]. La TWD ofrece una buena representación de los componentes de alta frecuencia en una imagen y permite representarla de una manera más compacta ya que la mayor parte de la energía se concentra en una cantidad pequeña de coeficientes.

Algunas de las propiedades más importantes de una wavelet son: filtros de reconstrucción suave, cortos y de fase lineal, soporte compacto, simetría, ortogonalidad, momentos vanishing y suavidad. La TWD de una imagen se obtiene convolucionando en los renglones y en las columnas un filtro pasa bajos (función de escalamiento Φ o wavelet padre) y un filtro pasa altos (función wavelet Ψ o wavelet madre). La figura 2 muestra dicho proceso.

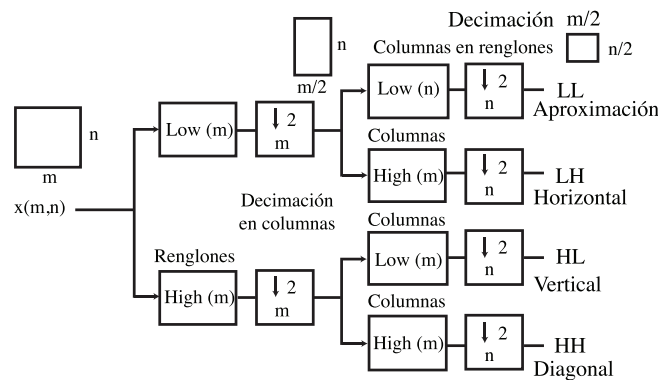


Fig. 2. Descomposición wavelet de una imagen.

Selección de la Familia Wavelet y Nivel de Resolución

La TWD es el núcleo del compresor de imágenes y la selección de la familia wavelet a utilizar afecta directamente, junto con otros factores, a la calidad de la imagen reconstruida.

Según [1], para la selección se debe tomar en cuenta la suavidad (orden del filtro) y los momentos vanishing (poder de aproximación de la función wavelet de escalamiento). Es decir, mientras mayor sea el número de momentos la función de escalamiento puede representar con mayor preci-

sión señales más complejas. Por otro lado, en [8] se examinaron medidas del comportamiento oscilatorio y sensibilidad de las aproximaciones de las escalas gruesas hacia las traslaciones de la señal. En ambos estudios se concluye que en la mayoría de los casos es recomendable seleccionar familias ortogonales. Para el presente trabajo de investigación se utilizarán cuatro transformadas ortogonales (Haar, Daubechies 4, Symlet 4 y Coiflet 4) y la transformada biortogonal 2.2.

Otro aspecto importante es el de seleccionar el nivel de descomposición wavelet que determina la resolución del nivel más bajo obtenido en dicho dominio, es decir el número de veces que se aplicará la TWD a la imagen. Un estudio hecho por [6] demostró que el número ideal es obtenido buscando un equilibrio entre la naturaleza de la señal y un criterio como el de la entropía, el nivel máximo de descomposiciones está definido por $\text{Log}_2(N)$ donde N es el tamaño de la imagen. Además, se asegura que el primer nivel de descomposición contiene el 98 % de la información importante para una buena compresión.

Filtros de Descomposición Wavelet

Para el diseño del filtro wavelet es importante tomar en cuenta el propósito final de la imagen, por ejemplo, si se diseñan filtros de orden alto se obtiene buena localización de frecuencia dado que se incrementa la compactación de energía. Los filtros de orden bajo tienen mejor localización en el tiempo y pueden preservar información importante acerca de los bordes. Lo ideal, al diseñar el filtro es encontrar un balance entre la longitud del filtro, el grado de suavidad y la complejidad de diseño.

La TWD ortogonal está completamente definida por el filtro de escalamiento RIF (Respuesta de Impulso Finito) de longitud $2N$ y suma 1 [8]. Primero se deben obtener los coeficientes del filtro de escalamiento y después se crea el filtro de descomposición definido por su longitud y orden N .

Los coeficientes se pueden obtener del toolbox de wavelets de Matlab [9]. Otra forma de obtener los coeficientes (Daubechies) es con el algoritmo de [10] que consta de dos pasos: Primero, se debe calcular el filtro L "Lagrange à trous" de orden N que es un filtro simétrico de longitud $4N - 1$ raíces, definido por:

$$L = [a(N)0 a(N-1)0 \dots 0 a(1)1 a(1)0 a(2)0 \dots 0 a(N)] \quad (1)$$

Donde:

$$a(k) = \frac{\prod_{i=-N+1}^N \left(\frac{1}{2} - i \right)}{\prod_{\substack{i=-N+1 \\ i \neq k}}^N (k-i)} \quad \text{para } k = 1, \dots, N \quad (2)$$

Después, se obtiene el vector R que contiene las raíces cuadradas en módulos complejos de los polinomios cuyos coeficientes son elementos del vector L ordenadas de forma descendente. Lo que se traduce al cálculo de los valores propios de L . Al final se obtiene el polinomio con raíces específicas que define los coeficientes del filtro.

La tabla 1 muestra los coeficientes para las wavelets Haar, Biortogonal 2.2 (B.2.2), Daubechies 4 (D4), Coiflet 4 (C4) y Symlet 4 (S4).

Tabla 1. Coeficientes del filtro de escalamiento

Haar	B 2.2	D4	S4	C4
0.5	-0.1250	0.162901	0.022785	0.01158
0.5	0.25	0.505472	-0.008912	-0.029320
	0.75	0.446100	0.070158	-0.047639
	0.25	-0.019787	0.210617	0.273021
	-0.1250	-0.132253	0.568329	0.574682
		0.021808	0.351869	0.294867
		0.023251	-0.020955	-0.054085
		-0.007493	-0.053574	-0.042026
				0.016744
				0.003967
				-0.001289
				-0.000509

El filtro de descomposición pasa bajo y pasa alto se diseña con los coeficientes del filtro de escalamiento. El primer paso es normalizar los coeficientes (*Coef*) obtenidos en la tabla 1 con la ecuación 3.

$$Coef = Coef / sum(Coef) \quad (3)$$

Donde *sum* es la sumatoria de todos los coeficientes del filtro de escalamiento. El filtro de descomposición pasa bajo (*Lo_D*) se obtiene con la ecuación 4:

$$Lo_D = \sqrt{2} * Coef \quad (4)$$

El filtro de descomposición pasa alto (*Hi_D*) se obtiene con la ecuación 5:

$$Hi_D = qmf(Lo_D) \quad (5)$$

Donde *qmf* (por sus siglas en inglés de *Quadrature Mirror Filter*) es un banco de filtros que cambia el orden de los coeficientes del vector (el último es el primero) y que cambia los signos de cada entrada par. La tabla 2 muestra los filtros pasa bajo y pasa alto para Haar, B2.2, D4 y S4, los filtros para C4 no se muestran debido a su tamaño (24 coeficientes).

Para la wavelet biortogon (B2.2) se definen de forma separada los filtros de descomposición y reconstrucción. Primero, se obtienen los coeficientes del filtro de escalamiento (tabla 1) después se realiza un rellenado dado que no es simétrico. Se agrega un 0 al final y se obtiene un nuevo vector de tamaño 6. Por último, se realiza el proceso de filtros ortogonales como se explicó anteriormente.

Tabla II. Filtro de descomposición haar, b2.2, d4 y S4

Filtro pasa bajos				Filtro pasa altos			
Haar	B2.2	D4	S4	Haar	B2.2	D4	S4
0.7071	0	-0.0106	-0.0758	-0.7071	0	-0.2304	-0.0322
0.7071	-0.1768	0.0329	-0.0296	0.7071	0.3536	0.7148	-0.0126
	0.3536	0.0308	0.4976		-0.7071	-0.6309	0.0992
	1.0607	-0.1870	0.8037		0.3536	-0.0280	0.2979
	0.3536	-0.0280	0.2979		0	0.1870	-0.8037
	-0.1768	0.6309	-0.0992		0	0.0308	0.4976
		0.7148	-0.0216			-0.0329	0.0296
		0.2304	0.0322			-0.0106	-0.0758

Convolución, Extensión y Downsampling

Para transformar una imagen con wavelets se utiliza un filtro pasa altos (FPA) para representar las frecuencias altas (partes detalladas de la imagen) y un filtro pasa bajos (FPB) para las frecuencias bajas (partes suaves de la imagen). Los filtros son trasladados y escalados mediante convolución en el eje del tiempo para producir un conjunto de funciones wavelets en diferentes colocaciones y en diferentes escalas.

En una imagen la convolución presenta problemas en las orillas, dado que puede introducir información que no estaba presente en la imagen original. Algunas soluciones a dicho problema son: extensión periódica y extensión simétrica. Como ejemplo considere la submatriz de 4 x 4 correspondiente a la imagen Lena (figura 3).

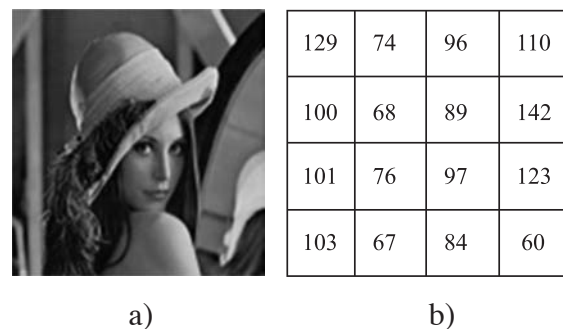


Fig. 3. Imagen ejemplo. a) Lena, b) Submatriz de píxeles de Lena.

Para el presente trabajo de investigación se utilizará la extensión periódica. Se debe realizar la extensión en las columnas y en los renglones al añadir *N/2* muestras al principio y al final de los cuatro extremos de la imagen (*N* = tamaño del filtro). Para la TWD Haar se añade una muestra en cada extre-

mo (2/1) (6 x 6) y para D4 se añaden 4 muestras (8/2) (12 x 12). La figura 4 muestra el resultado con la wavelet Haar, para la figura 3a.

60	103	67	84	60	103
110	129	74	96	110	129
142	100	68	89	142	100
123	101	76	97	123	101
60	103	67	84	60	103
110	129	74	96	110	129

Figura 4. Extensión periódica en las columnas y renglones.

Después de la extensión se realiza la convolución con el FPB en los renglones de la figura 4 el resultado con el filtro Haar se muestra en la figura 5.

42.426	115.26	120.21	106.77	101.82	115.26	72.832
77.782	169	143.54	120.21	145.66	169	91.217
100.41	171.12	118.79	111.02	163.34	171.12	70.711
86.974	158.39	125.16	122.33	155.56	158.39	71.418
42.426	115.26	120.21	106.77	101.82	115.26	72.832
77.782	169	143.54	120.21	145.66	169	91.217

Figura 5. Resultado de la convolución con el FPB en renglones de la figura 4.

La matriz resultante es de tamaño: $[ma + mb - 1, na + nb - 1]$ donde m son los renglones y n son las columnas de las respectivas matrices (a : matriz original y b : filtro). Enseguida se realiza la convolución en los renglones de la figura 4 con el FPA, el resultado se muestra en la figura 6.

-42.426	-30.406	25.456	-12.021	16.971	-30.406	72.832
-77.782	-13.435	38.891	-15.556	-9.8995	-13.435	91.217
-100.41	29.698	22.627	-14.849	-37.477	29.698	70.711
-86.974	15.556	17.678	-14.849	-18.385	15.556	71.418
-42.426	-30.406	25.456	-12.021	16.971	-30.406	72.832
-77.782	-13.435	38.891	-15.556	-9.8995	-13.435	91.217

Figura 6. Resultado de la convolución con el FPA en renglones de la figura 4.

La figura 5 es convolucionada en las columnas con el FPB (figura 7). Enseguida se realiza la convolución en las columnas con el FPA sobre la figura 5, el resultado se muestra en la figura 8. Después, la figura 6 se convolucionan en las columnas con el FPB (figura 9). Por último, se convolucionan las columnas con el FPA sobre la figura 6 el resultado se muestra en la figura 10.

30	81.5	85	75.5	72	81.5	51.5
85	201	186.5	160.5	175	201	116
126	240.5	185.5	163.5	218	240.5	114.5
132.5	233	172.5	165	225.5	233	100.5
91.5	193.5	173.5	162	182	193.5	102
85	201	186.5	160.5	175	201	116
55	119.5	101.5	85	103	119.5	64.5

Figura 7. Resultado de la convolución con el FPB en columnas de la figura 5.

-30	-21.5	18	-8.5	12	-21.5	51.5
-85	-31	43.5	-19.5	5	-31	116
-126	11.5	43.5	-21.5	-33.5	11.5	114.5
-132.5	32	28.5	-21	-39.5	32	100.5
-91.5	-10.5	30.5	-19	-1	-10.5	102
-85	-31	45.5	-19.5	5	-31	116
-55	-9.5	27.5	-11	7	-9.5	64.5

Figura 8. Resultado de la convolución con el FPA en columnas de la figura 5.

-30	-81.5	-85	-75.5	-72	81.5	-51.5
-25	-38	-16.5	-9.5	-3	-38	-13
-16	-1.5	17.5	6.5	-12.5	-1.5	14.5
9.5	9	-4.5	-8	5.5	9	-0.5
31.5	30.5	3.5	11	38	30.5	-1
-2.5	-38	-16.5	-9.5	-31	-38	-13
55	119.5	101.5	85	103	119.5	6.4

Figura 9. Resultado de la convolución con el FPB en columnas de la figura 6.

30	21.5	18	8.5	-12	21.5	-51.5
	-12	-9.5	2.5	19	-12	-13
16	-30.5	11.5	-0.5	19.5	-30.5	14.5
-9.5	10	3.5	0	-13.5	10	-0.5
-31.5	-10.5	30.5	-19	-1	-10.5	102
25	-12	-9.5	2.5	19	-12	-13
55	-9.5	27.5	-11	-7	-9.5	64.5

Figura 10. Resultado de la convolución con el FPA en columnas de la figura 6.

Las líneas punteadas de las matrices de las figuras 7, 8, 9 y 10 delimitan el tamaño de la matriz original (4 x 4). En dichas figuras es necesario realizar el downsampling (decimación) que consiste en seleccionar una de cada dos muestras en columnas y renglones (matrices de 2 x 2).

Del downsampling en la figura 7 se obtiene la matriz de coeficientes de aproximación (*LL* de la figura 2). Al aplicarlo sobre la figura 8 se obtiene la matriz de coeficientes verticales (*LH* de la figura 2). Al aplicarlo sobre la figura 9 se obtiene la matriz de coeficientes horizontales (*HL* de la figura 2). Por último, al aplicarlo en la figura 10 se obtiene la matriz de coeficientes diagonales (*HH* de la figura 2). La matriz de descomposición wavelet formada por las cuatro submatrices resultantes del downsampling se muestra en la figura 11a.

185	218	17.5	-12.5
173.5	182	3.5	38
43.5	-33.5	11.5	19.5
30.5	-1	-5.5	-25

2 LL	2 HL	1 HL
2 LH	2 HH	
1 LH		1 HH

Figura 11. Descomposición wavelet. a) Descomposición a un nivel, b) Descomposición a dos niveles.

El proceso se repite y se aplica a la matriz de coeficientes *LL*, la figura 11b muestra el proceso de descomposición a dos niveles.

Cuantificación

Al calcular la TWD de una imagen no se obtiene ningún tipo de compresión simplemente se convierten los datos a otro tipo de representación. Para lograr la compresión con pérdidas se realiza un proceso de cuantificación, es decir, se buscan aquellos coeficientes de magnitudes pequeñas para convertirlos en cero y poder codificarlos de manera más sencilla.

La cuantificación es una etapa de pérdida de información y es irreversible. Un factor de cuantificación alto da mejores porcentajes de compresión y un factor bajo permite conservar mayor calidad en la imagen reconstruida. Para la cuantificación se utilizarán dos enfoques: a) cambiar a cero los coeficientes de la diagonal inferior de la matriz, la figura 12a muestra el resultado sobre la imagen 11a, y b) cambiar a cero el primer nivel de descomposición, el resultado de aplicarla a la figura 11a se muestra en la figura 12b.

185	218	17.5	-12.5
173.5	182	3.5	0
43.5	-33.5	0	0
30.5	0	0	0

a)

185	218	0	0
173.5	182	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

b)

Figura 12. Cuantificación. a) Resultado de la diagonalización, b) Resultado del cambio a cero del primer nivel de descomposición.

Codificación por Entropía

La codificación por entropía se aplica a los coeficientes wavelet producto de la cuantificación, es un proceso sin pérdida de información que remueve la redundancia del flujo de bits a comprimir. Para este proceso se recomienda la codificación aritmética que requiere un estimado de la distribución de los coeficientes cuantificados. También se puede utilizar el algoritmo RLE (Run Length Encoding) o codificación Huffman. Junto con la información obtenida de la codificación se deben guardar datos acerca de la wavelet utilizada, el número de niveles, el tamaño de la imagen y la información del plano de color de la imagen ya sea RGB o escala de grises.

DESCOMPRESIÓN DE IMÁGENES

Para realizar el proceso de descompresión de imágenes se debe obtener la información resultante del proceso de compresión para después aplicar el proceso inverso para reconstruir la imagen.

Decodificación por Entropía

En esta etapa se debe aplicar el algoritmo de decodificación inverso que se seleccionó en la codificación (Huffman, RLE o Codificación Aritmética). Como resultado, se obtienen los coeficientes wavelet seleccionados en el proceso de cuantificación.

La Transformada Wavelet Discreta Inversa (TWDI)

Para transformar los coeficientes del dominio wavelet al dominio original se utiliza la Transformada Wavelet Discreta Inversa (TWDI), la cual hace uso del FPB y el FPA de reconstrucción. El proceso se muestra en la figura 13.

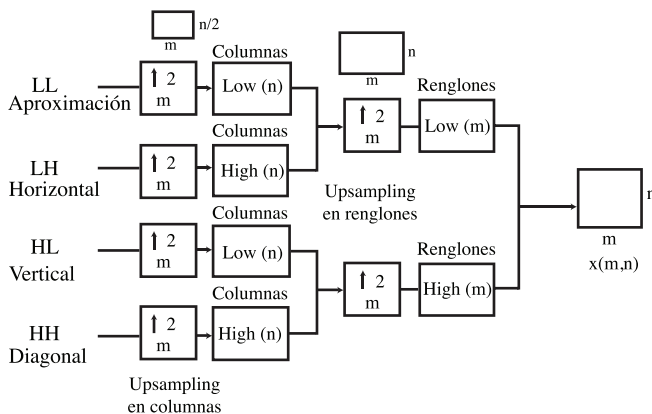


Figura 13. Reconstrucción wavelet de una imagen.

Filtros de Reconstrucción Wavelet

Para el caso de las wavelets ortogonales los filtros de reconstrucción se obtiene de los filtros de descomposición. El filtro de reconstrucción pasa bajos (Lo_R) se obtiene con la ecuación 6 y el filtro de reconstrucción pasa altos (Hi_R) con la ecuación 7.

$$Lo_R = Coefrev(Lo_D) \quad (6)$$

$$Hi_R = Coefrev(Hi_D) \quad (7)$$

Donde *Coefrev* reordena las posiciones del vector, el último elemento es ahora el primero, el penúltimo el segundo y así sucesivamente.

Para las wavelets biortogonales los coeficientes de reconstrucción no son iguales a los coeficientes de descomposición. Primero, se deben crear los coeficientes de descomposición, para la wavelet biortogonal 2.2 son: 0.5, 0.25, 0.5. Después se realiza el rellenado para igualar el tamaño del filtro de descomposición (tamaño 6). Por último, se obtiene el filtro ortogonal de reconstrucción con el proceso que se explicó anteriormente. La tabla 3 muestra los filtros de reconstrucción Haar, B2.2, D4 y S4.

Upsampling, Extensión y Convolución

Para descomprimir una imagen se toma cada una de las matrices de coeficientes (2 x 2), y se aplica la operación de upsampling (se agregan muestras en los renglones y las columnas) para obtener el tamaño de la matriz original (4 x 4).

La figura 14a muestra el resultado del upsampling sobre la matriz wavelet de aproximación (LL). La figura 14b muestra el resultado con la matriz horizontal (LH) y la figura 14c con la matriz vertical (HL). Los cálculos para la matriz diagonal (HH) no se muestran dado que son ceros (ver figura 12).

185.5	0	218.5	0	17.5	0	-12.5	0	43.5	0	-33.5	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
173.5	0	182	0	3.5	0	0	0	30.5	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a)				b)				c)			

Figura 14. Upsampling en columnas y renglones. a) Matriz LL, b) Matriz LH y c) Matriz HL.

Es necesario realizar una extensión periódica de las matrices de la figura 14a, b, c en los renglones y en las columnas, el resultado se muestra en las figuras 15a, 15b y 15c respectivamente.

Tabla III. Filtros de reconstrucción haar, b2.2, d4 y S4.

Filtro pasa bajos				Filtro pasa altos			
Haar	B2.2	D4	S4	Haar	B2.2	D4	S4
0.7071	0	0.2304	0.0322	-0.7071	0	-0.0106	-0.0758
0.7071	0.3536	0.7148	-0.0126	0.7071	0.1768	-0.0329	0.0296
	0.7071	0.6309	-0.0992		0.3536	0.0308	0.4976
	0.3536	-0.0280	0.2979		-1.0607	0.1870	-0.8037
	0	-0.1870	0.8037		0.3536	-0.0280	0.2979
	0	0.0308	0.4976		0.1768	-0.6309	0.0992
		0.0329	-0.0296			0.7148	-0.0216
		-0.0106	-0.0758			-0.2304	-0.0322

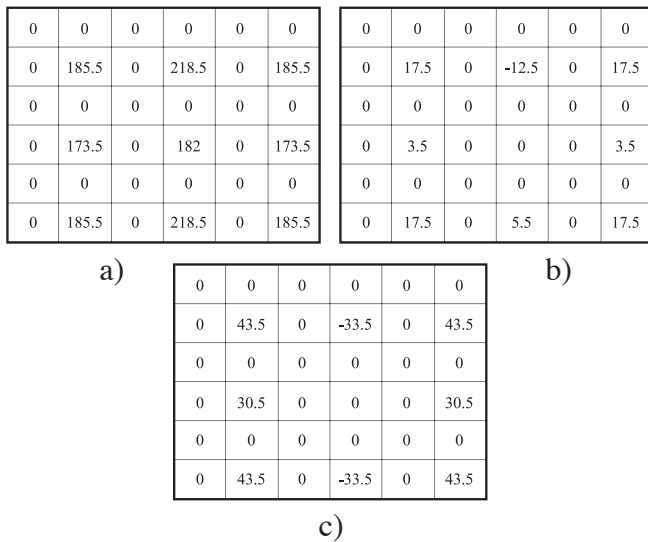


Figura 15. Extensión en columnas y renglones. a) Matriz LL, b) Matriz LH, c) Matriz HL.

Después se aplica el proceso de convolución sobre la figura 15a en las columnas con el FPB (figura 16a), posteriormente se aplica el mismo filtro en los renglones (figura 16b).

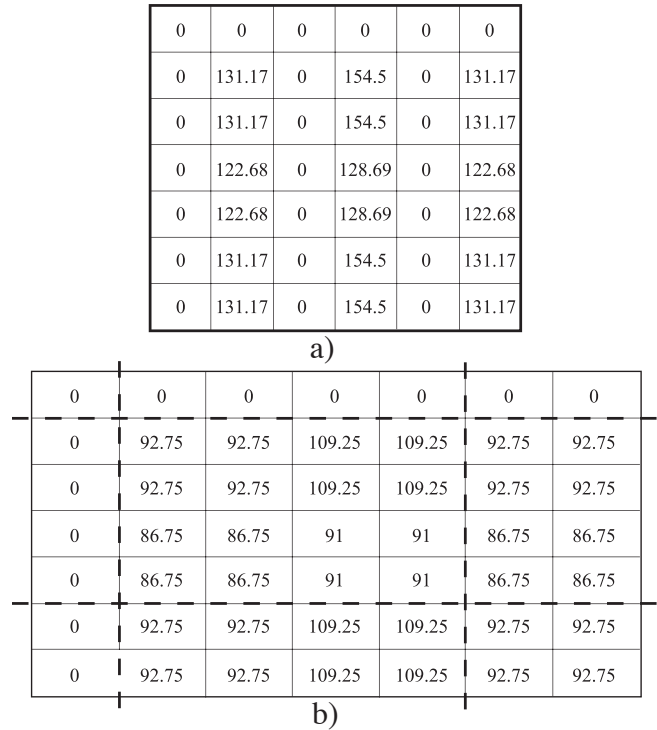


Figura 16. Convolución. a) columnas con el FPB, b) renglones con el FPB.

Para la figura 15b se aplica con el FPA en las columnas (figura 17b) y con el FPB en los renglones (figura 17b). En el caso de la figura 15c se aplica en las columnas con el FPB (figura 18a) y en los renglones con el FPA (figura 18b).

0	0	0	0	0	0
0	12.374	0	-8.8388	0	12.374
0	-12.374	0	8.8388	0	-12.374
0	2.4749	0	0	0	2.4749
0	-2.4749	0	0	0	-2.4749
0	12.374	0	-8.8388	0	12.374
0	-12.374	0	8.8388	0	-12.374

a)

0	0	0	0	0	0	0
0	8.75	8.75	-6.25	-6.25	8.75	8.75
0	-8.75	-8.75	6.25	6.25	-8.75	-8.75
0	1.75	1.75	0	0	1.75	1.75
0	-1.75	-1.75	0	0	-1.75	-1.75
0	8.75	8.75	-6.25	-6.25	8.75	8.75
0	-8.75	-8.75	6.25	6.25	-8.75	-8.75

b)

Figura 17. Convolución. a) columnas con el FPA, b) renglones con el FPB.

0	0	0	0	0	0
0	30.759	0	-23.688	0	30.759
0	30.759	0	-23.688	0	30.759
0	21.567	0	0	0	21.567
0	21.567	0	0	0	21.567
0	30.759	0	-23.688	0	30.759
0	30.759	0	-23.688	0	30.759

a)

0	0	0	0	0	0	0
0	21.75	-21.75	-16.75	-16.75	21.75	-21.75
0	21.75	-21.75	-16.75	-16.75	21.75	-21.75
0	15.25	-15.25	0	0	15.25	-15.25
0	15.25	-15.25	0	0	15.25	-15.25
0	21.75	-21.75	-16.75	-16.75	21.75	-21.75
0	21.75	-21.75	-16.75	-16.75	21.75	-21.75

b)

Figura 18. Convolución. a) columnas con el FPB, b) renglones con el FPA.

Por último, las cuatro matrices (delimitadas por líneas de la figura 16b, 17b, 18b y la de ceros) se suman para obtener la imagen reconstruida final. La figura 19a muestra la reconstrucción con la cuantificación diagonal y la imagen 19b con la eliminación del primer nivel de detalle.

123.5	79.75	86.25	119.75
105.75	62.25	98.75	132.25
103.75	73.25	91	91
100.25	69.75	91	91

a)

92.75	92.75	109.25	109.25
92.75	92.75	109.25	109.25
86.75	86.75	91	91
86.75	86.75	91	91

b)

Figura 19. Reconstrucción. a) Imagen reconstruida del proceso de diagonalización, b) Imagen reconstruida del proceso de eliminación del primer nivel detalle.

PRUEBAS Y RESULTADOS

En un compresor de imágenes con pérdidas es importante medir dos factores: a) Factor de Compresión (FC) que es el resultado de la división del espacio de almacenamiento de la imagen original entre el espacio de la imagen en el dominio comprimido y b) comparación del error de la Imagen reconstruida (I') con respecto a la Imagen original (I).

Para determinar la calidad (error de la imagen reconstruida) se utilizaron cuatro medidas [11]: Error Cuadrático Medio (Mean Square Error (MSE)), Relación Señal/Ruido Pico (Peak Signal to Noise Ratio ($PSNR$)), el error relativo de la norma de Frobenius (F) y la norma 2 ($N2$).

La figura 20 muestra los ejemplos de las imágenes obtenidas después del proceso de descompresión para el caso de diagonalización, mientras que la figura 21 muestra las imágenes obtenidas para el caso de eliminación del primer nivel de descomposición.

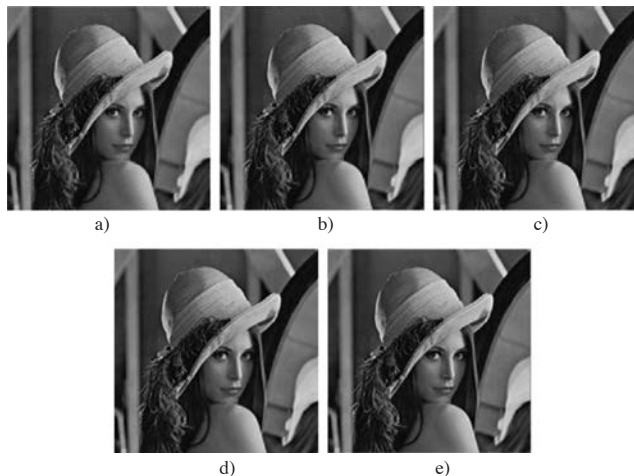


Figura 20. Imágenes obtenidas del proceso de diagonalización. a) Haar, b) B 2.2, c) D4, d) S4 y e) C4.

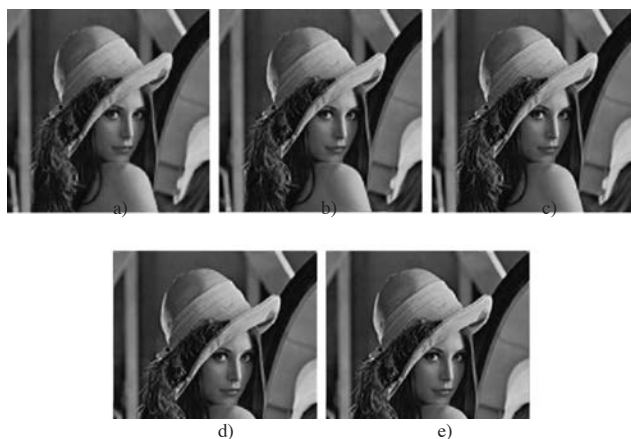


Figura 20. Imágenes obtenidas del proceso de eliminación del primer nivel de detalle. a) Haar, b) B 2.2, c) D4, d) S4 y e) C4.

La tabla 4 muestra los resultados de error para las cinco familias wavelet, para la reconstrucción de la imagen por diagonalización (figura 12a) y la tabla 5 muestra los resultados obtenidos por eliminación del primer nivel de detalle (figura 12b).

Tabla IV. Medidas de error para las imágenes reconstruidas por diagonalización

Imagen	FC	MSE	PSNR	F	N ₂
Haar	1.99.1	63.6396	30.0935	0.0712	0.0192
B 2.2	1.99.1	43.4426	31.7516	0.0588	0.0242
D4	1.99.1	35.9591	32.5727	0.0535	0.0164
S4	1.99.1	33.8522	32.8349	0.0519	0.0154
C4	1.99.1	37.1968	32.4257	0.0544	0.0239

Tabla V. Medidas de error para las imágenes reconstruidas por eliminación del primer nivel de detalle

Imagen	FC	MSE	PSNR	F	N ₂
Haar	4:1	110.9290	27.6804	0.0939	0.0219
B 2.2	4:1	70.6891	29.6373	0.0750	0.0252
D4	4:1	62.4832	30.1732	0.0705	0.0180
S4	4:1	69.2155	29.7288	0.0742	0.0273
C4	4:1	62.1057	30.1995	0.0703	0.0247

El *FC* es mejor en las imágenes con eliminación del primer nivel de detalle, pero la reconstrucción presenta el *MSE* más grande. Las matrices diagonalizadas tienen un *FC* menor pero la reconstrucción es mejor. Por lo que se puede concluir que el esquema de cuantificación juega un papel muy importante.

Por otro lado, la mejor reconstrucción para la diagonalización se obtiene con la S4 mientras que para la eliminación de detalle se obtiene con la wavelet C4. Para la diagonalización los siguientes mejores desempeños son D4, C4 B 2.2 y Haar. Para la eliminación de detalle son D4, S4, B 2.2 y Haar respectivamente.

CONCLUSIONES

En el presente artículo se mostraron los detalles necesarios para el diseño de un sistema de compresión de imágenes con pérdidas con la transformada wavelet. La principal aportación es la metodología presentada y los detalles para el diseño del codificador.

Se obtienen buenos resultados con la wavelet Daubechies D4 y para las dos categorías de cuantificación los resultados en el desempeño son diferentes lo que ratifica la hipótesis de que es muy

importante la selección de la familia wavelet para el desempeño del compresor.

A futuro se realizarán pruebas con otros esquemas de cuantificación como el Embebed Zerotree Wavelet (EZW) y el Set Partitioning In Hierarchical Trees (SPIHT), además de comprimir la imagen de acuerdo al factor de compresión deseado o al nivel de error.

REFERENCIAS

- M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu e I. Daubechies. "Image Coding Using Wavelet Transform". *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 1, no. 2, pp. 205-220, Abril 1992.
- B. E Ursevitch. "A Tutorial on Modern Lossy Wavelet Image Compression: Foundations of JPEG 2000". *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 18, no. 5, pp. 22-35, Septiembre 2001.
- A Said y W. Pearlman. "A New Fast and Efficient Image Codec Based on Set Partitioning in Hierarchical Trees". *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 243-250, Junio 1996.
- P. N. Topiwala. *Wavelet Image and Video Compression*, Kluwer, Boston USA, 1998.
- G. Davis y A. Nosratinia. "Wavelet-Based Image Coding: An Overview". *Applied and Computational Control, Signals, and Circuits*, vol. 1, no. 1, pp. 205-269, 1998.
- R. C. Gonzalez, R. E. Woods y S. L. Eddins. *Digital Image Processing Using Matlab*. Pearson Prentice Hall, USA, 2004.
- Ôktem R., "Transform Domain Algorithms for Image Compression and Denoising". Tesis de maestría, Laboratorio de procesamiento de señales de la Universidad Tecnológica de Tampere, Finlandia, 2000.
- J. Villaseñor, B. Belzer y J. Lia. "Wavelet Filter Evaluation for Image Compression". *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 4, no. 8, pp. 2464-2482, Agosto 1995.
- M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim y J. M. Poggi. "Wavelet toolbox: Guía de Usuarios Versión 3". *The Mathworks*, 2004.
- M. J. Shensa. "The Discrete Wavelet Transform: Wedding the a Trouns and Mallat Algorithms". *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 40, no. 10, pp. 2464-2482, Octubre 1992.
- M. Irak, S. Grgic y M. Grgic. "Picture Quality Measures in Image Compression Systems". *Proc. 2003 IEEE International Conference on Computer as a Tool (EUROCON)*, vol. 1, pp. 233-236.

■ ARTÍCULO DE REVISIÓN

Modelo de navegación autónoma para vehículos robotizados en transporte urbano

*Edgar A. Martínez García, Rafael Torres y Ricardo Ávila

RESUMEN

Se describe la modelación matemática para llevar a cabo el control de un vehículo autónomo en entornos complejos y dinámicos. En el modelo propuesto se combinan ecuaciones de tiempo continuo con planeación basada en la física del movimiento (Newton-Legiumur), de acuerdo a la configuración cinemática del vehículo con componentes de campos direccionales exponenciales. En el esquema propuesto se plantean fuerzas interactivas de atracción y repulsión cuyo vector de control se modela con segundas derivadas de la posición del vehículo ante la presencia de obstáculos estáticos y dinámicos. El enfoque de gradientes de dirección propuesto tiene una modalidad de posicionamiento basado en velocidad, e integra una solución general de cinemática directa combinada con las restricciones geométricas de un sistema de locomoción rodante de cuatro puntos de contacto. El modelo propuesto es fácil de implementar en arquitecturas robóticas móviles y lograr confiabilidad y seguridad en el control de manejo autónomo, así como su capacidad libre de colisiones en ambientes dinámicos, complejos e impredecibles.

Palabras clave: navegación reactiva, fusión sensorial, restricciones cinemáticas, planeación.

INTRODUCCIÓN

Un vehículo inteligente se compone de una gran variedad de aspectos, que incluyen la fusión de tecnologías de información, planeadores inteligentes, vehículos robotizados, dispositivos tecnológicos automotores, sistemas de arquitecturas distribuidas, entre muchos otros elementos. Los vehículos

inteligentes son carros mejorados instrumentados con todos estos aspectos y podrían ayudar a reducir críticamente el número de accidentes producidos por errores humanos. El enfoque propuesto generaliza un método de control de navegación en ambientes urbanos que se fundamenta en un algoritmo de control que simultáneamente sensa la posición y orientación de diversos de obstáculos, y usa tal

*edmartin@uacj.mx

información sensorial para mejorar el control de la navegación mientras el vehículo se mueve hacia la meta deseada. Se propone una formulación matemática para deducir una función de navegación la cual incluye campos direccionales con componentes exponenciales para ser aplicable a ciber-vehículos de control de velocidad diferencial. En este trabajo se reformula un modelo de campos direccionales reportado en (Helbin, 1995) para simular el movimiento de peatones en ambientes concurrenciosos. Sin embargo el presente trabajo integra un marco de planeación reactiva de rutas, incluyendo la cinemática de vehículos y dinámica basada en modelos físicos en tiempo continuo de movimiento aplicado en sistemas de locomoción rodantes. La mayoría de las técnicas usadas se basan en estrategias de odometría discreta requiriendo los valores de las velocidades angulares de las ruedas. Nuestro enfoque está orientado a la cinemática real de las limitaciones del vehículo con cuatro puntos de contacto; con dos ruedas sincronizadas por lado. Sin embargo, a pesar de las restricciones geométricas de locomoción, el marco propuesto acepta cualquier adaptación de las limitaciones cinemáticas móviles si la posición del vehículo esta dada por un vector de estado.

El concepto del modelo de fuerzas sociales fue introducido por Helbin y Molnar (D. Helbin, 1995) para simular fuerzas dinámicas en ambientes concurrenciosos con analogías a los fluidos y gases. Este modelo está relacionado con modelos de tráfico dinámico de fluidos y gases, y gran atención se ha centrado en enfoques de tráfico vehicular. En (G. Campion, 1996) se describe una teoría fundamental en clasificación de modelos cinemáticos y dinámicos de robots móviles rodantes. Los autores de (D. Fox, 1997) presentaron un enfoque de un modelo dinámico derivado del movimiento del robot propuesto para obstáculos reactivos y escape de colisiones basados en una ventana dinámica de velocidades compuesta por velocidades y aceleraciones limitadas. En (R. Rocha 2007) se reporta un enfoque arquitectónico de conceptos de movilidad

para ciber-vehículos eléctricos, basado en la programación semi-autónoma. Así mismo, un modelo dinámico es propuesto para estimar los parámetros de un vehículo tipo Ackerman, que tiene fundamentos de modelos cinemáticos para simulación generalizada del movimiento del centro de gravedad de los vehículos, que fue reportada en (K. Macek, 2007). Este trabajo además se enfoca en el estudio de la fricción estática entre la rueda y el pavimento para el cual los parámetros del vehículo son identificados para finalmente generar control en el vehículo. Por ejemplo para seguimiento de la línea blanca de la carretera, etc. En (Y. Koren, 1991) se reportó un marco matemático con fundamentos en resultados empíricos sobre navegación reactiva usando la función histograma de campos potenciales. En (G. Antonelli, 2006) se reportó un análisis de cinemática de control diferencial para estimación lineal de parámetros usando un enfoque odométrico para calibración usando un enfoque de mínimos cuadrados.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema que se plantea es definir una estrategia robusta y efectiva de movilidad combinando las restricciones cinemáticas del vehículo, así como los aspectos de dinámica de dos principales clases de obstáculos. Los objetos estáticos tal como las líneas de la carretera (derecha e izquierda), automóviles estacionados, área de la carretera, y señalamientos viales. Así como también los objetos dinámicos tal como los vehículos en movimiento, peatones cruzando la carretera, bicicletas/motocicletas. La figura 1 muestra un diagrama de configuración de una carretera urbana con los objetos característicos que la conforman. En la figura 1, el vehículo μ es definido con su propio sistema inercia fijo con origen en su centro de gravedad cg . El vehículo persigue un conjunto de metas locales definidas por cruces a lo largo del camino a recorrer y que son simbolizadas por γ , las cuales generan fuerzas acelerativas de atracción. En el mismo escenario existen ob-

jetos dinámicos denominados objetos β , tal como otros vehículos navegando en dirección opuesta a lo largo del carril izquierdo con diferentes velocidades, peatones, o incluso cualquier otro medio de transporte. Para el caso de objetos estáticos definidos por la letra griega α , éstos se caracterizan por vehículos estacionados, y señales de tráfico principalmente, hacia los cuales se generan fuerzas de aceleración repulsivas que evitan que el vehículo se colisione. Ciertas áreas o zonas son identificadas como puntos cartesianos por el vector de posición $\mathbf{x}_t=(x,y)^T$ en tiempo actual t . Diversas localizaciones pueden ser descritas por vector de posición tal como la posición de un obstáculos \mathbf{x}_α , la posición proyectada de objetos dinámicos \mathbf{x}_{t+1}^β , la posición actual del vehículo \mathbf{x}_t^μ , o puntos de atracción \mathbf{x}_{t+1}^γ . La distancia cartesiana entre dos elementos se define por la norma de sus vectores de posición como $\delta=\|\mathbf{x}_t^\mu-\mathbf{x}_t^\beta\|$. Las fuerzas acelerativas repulsivas ante objetos estáticos se definen por \mathbf{F}_t^α . Para el caso de objetos dinámicos se definen por \mathbf{F}_t^β . De manera similar las fuerzas acelerativas de atracción se definen por el vector \mathbf{F}_t^γ .

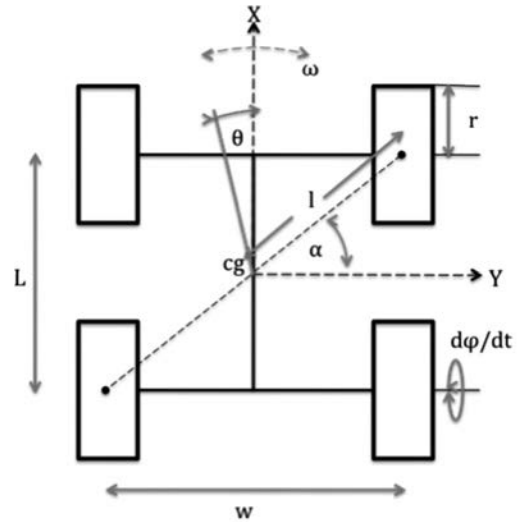
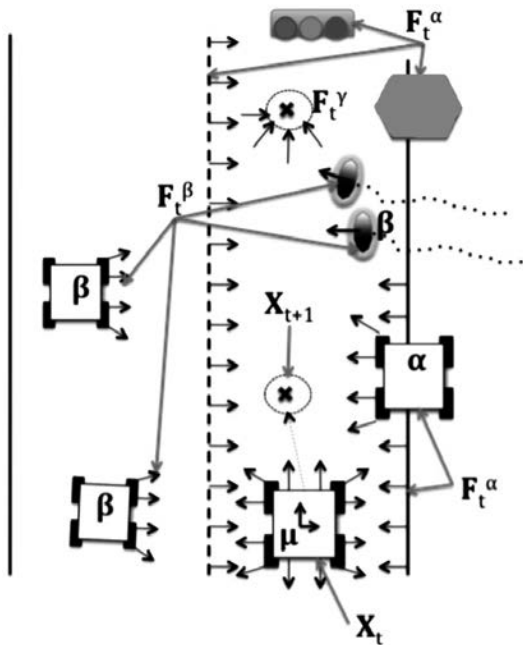


Figura 1: Izquierda: Ambiente de navegación con múltiples objetos estáticos y dinámicos interactuando entre fuerzas potenciales. Derecha: Restricciones cinemáticas de un vehículo de velocidad diferencial de cuatro puntos de contacto.

El presente esquema considera el análisis de un vehículo de control de velocidad diferencial como el reportado en (G. Antonelli, 2006). No obstante para el esquema propuesto, otro tipo de restricciones cinemáticas también pueden ser integradas, tal como la configuración Ackerman (G. Campion, 1996), (D. Fox, 1997) and (R. Rocha 2007). La contribución de este manuscrito es una reformulación del modelo propuesto por Helbin (d. Helbin, 1995), cuya modificación adapta un modelo de locomoción rodante. El modelo de campos direccionales exponenciales es combinado en el presente artículo con un modelo generalizado de velocidad en diferentes planos inerciales fundamentado en (K. Macek, 2007). Esta combinación permite la cinemática directa de cualquier modelo geométrico de locomoción; también se propone un modelo para determinar la velocidad angular en términos de las dimensiones físicas del vehículo, en lugar de inferirla mediante cálculos de odometría.

MODELO CINEMÁTICO GENERAL

En esta sección presentamos un modelo que describe la velocidad angular del *cg* basándose en las medidas físicas del vehículo (largo y ancho), y las velocidades rotacionales de las ruedas que gobiernan la aceleración angular del vehículo (figura 1 derecha). Sea v_t definida como la velocidad lineal instantánea del vehículo en tiempo t , se define una expresión como en (K. Macek, 2007). Ambas velocidades se componen de un vector de control basado en velocidad mediante la ecuación (1), en el cual sus componentes pertenecen al sistema relativo fijo al vehículo, y relacionadas también a las velocidades rotacionales de las ruedas,

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r_r}{2} & \frac{r_l}{2} \\ \frac{r_r}{W} & -\frac{r_l}{W} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi}_t^r \\ \dot{\phi}_t^l \end{pmatrix} \quad (1)$$

Dada la velocidad lineal de cualquier rueda descrita por $v_{l,r} = r_{r,l} (d\phi_{l,r}/dt)$, cuya expresión dependerá de la velocidad rotacional $d\phi/dt$ y los radios nominales de las ruedas r_r y r_l , derecha e izquierda respectivamente. Un enfoque común para calcular la velocidad lineal del *cg* se basa en que las velocidades tangenciales laterales se aproximan a su valor real mediante un promediado de ambos lados denominadas v_l y v_r con la ecuación $v_t = (v_l + v_r)/2$. Definiendo el vector de velocidades \mathbf{v}_t^r en el sistema inercial relativo fijo al vehículo tenemos a (2),

$$\mathbf{v}_t^r = v_t \begin{pmatrix} \cos(\theta_t) \\ \sin(\theta_t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

El vector de velocidades depende de la magnitud de la velocidad lineal en la dirección θ_t , el cual es la orientación actual respecto a la posición inicial del vehículo. El vector es transformado para ser expresado en un sistema inercial global o común mediante la ecuación (3), la cual describe su rotación en el sistema inercial fijo del vehículo, donde ψ_t es el ángulo entre la orientación del sistema inercial

del vehículo y el sistema de coordenadas global. Mediante una transformación homogénea usando la matriz Euleriana R_z tenemos la expresión,

$$\mathbf{v}_t^l = \mathbf{R}(\psi_t) \mathbf{v}_t^r \quad (3)$$

Sustituyendo las variables y desarrollando la transformación espacial, tenemos la expresión en (4),

$$\mathbf{v}_t^l = \begin{pmatrix} \cos(\psi_t) & -\sin(\psi_t) \\ \sin(\psi_t) & \cos(\psi_t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_t \cos(\theta_t) \\ v_t \sin(\theta_t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Desarrollando algebraicamente obtenemos la velocidad en el sistema inercial global (5),

$$\mathbf{v}_t^l = \begin{pmatrix} v_t \cos(\theta_t) \cos(\psi_t) - v_t \sin(\theta_t) \sin(\psi_t) \\ v_t \cos(\theta_t) \sin(\psi_t) + v_t \sin(\theta_t) \cos(\psi_t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Simplificando (5) mediante el uso de identidades trigonométricas en la ecuación (6), se expresa el comportamiento del *cg* como un movimiento general de una partícula, donde hasta ahora las restricciones geométricas del vehículo no son tomadas en cuenta,

$$\mathbf{v}_t^l = \begin{pmatrix} v_t \cos(\theta_t + \psi_t) \\ v_t \sin(\theta_t + \psi_t) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Para representar analíticamente la aceleración del centro de gravedad del vehículo en un sistema inercial globalizado, se deriva (6) respecto al tiempo, y se obtiene (7),

$$\dot{\mathbf{v}}_t^l = v_t (\dot{\theta}_t + \dot{\psi}_t) \begin{pmatrix} -\sin(\theta_t + \psi_t) \\ \cos(\theta_t + \psi_t) \end{pmatrix} + \dot{v}_t \begin{pmatrix} \cos(\theta_t + \psi_t) \\ \sin(\theta_t + \psi_t) \end{pmatrix} \quad (7)$$

Transformamos la aceleración a un sistema inercial inverso (fijo en el vehículo) se obtiene (8),

$$\dot{\mathbf{v}}_t^r = R^{-1}(\psi_t) \dot{\mathbf{v}}_t^l \quad (8)$$

Sin pérdida de generalidad, la simplificación matemática resultante es escrita en la ecuación (9).

$$\dot{v}_i^r = v_i(\dot{\theta}_i + \dot{\psi}_i) \begin{pmatrix} -\sin(\theta_i) \\ \cos(\theta_i) \end{pmatrix} + \dot{v}_i \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) \end{pmatrix} \quad (9)$$

A través de (9) tenemos un modelo que genera un comportamiento general de movimiento, sin considerar causas externa o internas de movilidad. Siendo (9) un modelo general para cualquier tipo de locomoción.

Cinemática del Vehículo

La expresión (9) considera que el *cg* del vehículo se encuentra idealmente en su centro geométrico. No obstante, sin la existencia de restricciones geométricas desplazamientos realísticos del vehículo no se pueden modelar. Nótese que las ecuaciones (7) y (9) proveen controlabilidad solo en términos de las aceleraciones en ambos sistemas inerciales, y una mínima modificación podría necesitarse para implementación de control de movilidad en vehículos reales. De acuerdo al esquema geométrico en la figura 1 (derecha), se deduce ahora un conjunto de ecuaciones que calcula la velocidad angular del vehículo ω en base a restricciones cinemáticas, a diferencia de la ecuación (9) que no considera tales restricciones. Las restricciones cinemáticas del vehículo limitan la geometría de su movimiento. La ecuación (10) se deduce al involucrar el ángulo α que mide la orientación del vehículo respecto a cada punto de contacto de las ruedas con una distancia l .

$$\cos(\alpha) = \frac{W}{2l} \quad (10)$$

Entonces l se define por,

$$l = \frac{\sqrt{W^2 + L^2}}{2} \quad (11)$$

A partir de la definición que establece que el radio r de un centro de rotación cualesquiera, con velocidad angular $d\theta/dt$, se determina su velocidad tangencial mediante $r=v/(d\theta/dt)$. La velocidad de rotación del vehículo $d\theta/dt$, se infiere de la compo-

nente de la velocidad diferencial proyectada sobre el eje horizontal de vehículo definida por,

$$\omega_i = \frac{(v_i^r - v_i^l)\cos(\alpha)}{2l} \quad (12)$$

Con la expresión (12) modelamos la velocidad rotacional, y la orientación instantánea del vehículo, en lugar de sensar las velocidades de las ruedas. Información relacionada sobre las restricciones geométricas del vehículo se pueden consultar en (G. Campion,1996). Considerando que las velocidades lineales se definen por $v_{l,r} = \varphi_i r_{l,r}$, de acuerdo a (1), la diferencia de velocidades en ambos lados del vehículo impactarán la orientación del vehículo. La siguiente expresión define la velocidad angular del vehículo,

$$\omega_i = \frac{(r^r \dot{\varphi}_i^r - r^l \dot{\varphi}_i^l)W}{4(W^2 + L^2)} \quad (13)$$

La velocidad angular del vehículo se controlar directamente a partir de la rotación asíncrona de las ruedas. De tal forma que, para cualquier situación que requiera control de seguimiento de una trayectoria, nuestro modelo necesita generar una predicción exacta de la velocidad de dirección ω_i . Para propósitos de simplicidad, de aquí en adelante, asumiremos un mismo radio nominal para todas las ruedas $r_r = r_l$, así como también el factor K en (14),

$$K = \frac{W}{4(W^2 + L^2)} \quad (14)$$

El control de velocidad de cada rueda se hace directamente mediante el envío de un comando de control digital a los actuadores que impulsan las ruedas a rotar, utilizando un modelo no lineal de velocidad rotacional disponible en muchos motores y controladores comerciales. Muchos productos utilizan funciones sigmoides como el experimentalmente obtenido en laboratorio descrito por (15),

$$\dot{\varphi}_i(d[t]) = \left(\frac{a}{1 + e^{-\lambda d[t] - M}} \right) - b \quad (15)$$

Donde a y b son constantes que ajustan el comportamiento no lineal de la velocidad angular del actuador. Λ es la constante de caída asintótica, mientras que $d[t]$ es el comando de control digital, el cual es la variable independiente de la función, M es el valor central de la curva de velocidad.

MODELO DE MOVILIDAD

En esta sección se desarrolla el modelo tomado en cuenta para describir la dinámica del movimiento del vehículo. La expresión (16) describe las causas externas que afectan la motivación interna de movimiento del vehículo. Las causas externas generan un movimiento no uniforme en el vehículo, y de acuerdo al principio de superposición el comportamiento emergente de movimiento se expresa en términos del vector de aceleración que se globaliza por $\mathbf{F}=(a_x, a_y)^T$, el cual es la aceleración resultante todas las fuerzas involucradas asociadas los diferentes eventos dinámicos.

$$\mathbf{F}_t^\mu = \dot{\mathbf{v}}_t^o + \sum_i \dot{\mathbf{v}}_t^{\alpha,i} + \sum_j \dot{\mathbf{v}}_t^{\beta,j} + \sum_l \dot{\mathbf{v}}_t^{\gamma,l} \quad (16)$$

La ecuación (16) es específicamente definida en (17), donde $\delta = \|\mathbf{x}_{t+1} - \mathbf{x}_t\|$ es la distancia entre la posición del vehículo cg en \mathbf{x}_t y la siguiente posición deseada \mathbf{x}_{t+1} . Existe un conjunto de vectores de aceleración relacionados a fuerzas repulsivas en contra de n obstáculos α , y se denotan por el vector $d\mathbf{v}_t^\alpha/dt$. Así mismo, un conjunto de fuerzas repulsivas en contra de m obstáculos dinámicos se expresan por $d\mathbf{v}_t^\beta/dt$. Finalmente, el vector de las fuerzas atractivas hacia las metas se define por $d\mathbf{v}_t^\gamma/dt$. También existe una velocidad lineal ideal v^o , un vector de la velocidad real actual \mathbf{v}_t y un tiempo de relajación τ aproximadamente constante, el cual es el intervalo de tiempo que el vehículo cambia de velocidades. Por lo tanto podemos igualar (9) con (17) para las aceleraciones en un sistema inercial globalizado.

$$\mathbf{F}_t^\mu = \frac{1}{\tau} \left(\frac{v^o}{\|\delta\|} (\mathbf{x}_{t+1} - \mathbf{x}_t) - \mathbf{v}_t \right) + \dot{\mathbf{v}}_t^{\alpha,1} + \dots + \dot{\mathbf{v}}_t^{\alpha,n} + \dot{\mathbf{v}}_t^{\beta,1} + \dots + \dot{\mathbf{v}}_t^{\beta,m} + \dot{\mathbf{v}}_t^{\gamma,1} + \dots + \dot{\mathbf{v}}_t^{\gamma,l} \quad (17)$$

Los efectos generados en la aceleración preferida es el término de lado izquierdo en (18), mientras que el término de lado derecho expresa las causas internas/externas del movimiento. Así que,

$$\dot{\mathbf{v}}_t^{cg} = \mathbf{F}_t^\mu \quad (18)$$

Algebraicamente desarrollando la ecuación (18) que es la segunda ley del movimiento de Newton con masa unitaria, se obtiene la expresión (19),

$$\mathbf{v}_t = -d_\tau (\dot{\theta}_t + \dot{\psi}_t) \begin{pmatrix} -\sin(\theta_t) \\ \cos(\theta_t) \end{pmatrix} - v_t \begin{pmatrix} \cos(\theta_t) \\ \sin(\theta_t) \end{pmatrix} + \sum_i \mathbf{v}_t^{\alpha,i} + \sum_j \mathbf{v}_t^{\beta,j} + \sum_l \mathbf{v}_t^{\gamma,l} + \frac{v^o}{\|\delta\|} (\mathbf{x}_{t+1} - \mathbf{x}_t) \quad (19)$$

El modelo de dinámica del movimiento se combina con el enfoque de un campo direccional que describe la trayectoria del vehículo en términos de las velocidades, en lugar de las aceleraciones. Donde $d_\tau = \tau v_t$, describe un pequeño desplazamiento del vehículo durante el tiempo de relajación. Definiendo el vector de posición tendríamos $\mathbf{x}_t = (x_t, y_t)^T$ con base a una ecuación general de movimiento dada por (20), y más específicamente, la velocidad ideal en el modelo se expresa como sigue,

$$\mathbf{x}_t = \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 + \int_{t_0}^t v_t \cos(\theta_t) dt \\ y_0 + \int_{t_0}^t v_t \sin(\theta_t) dt \end{pmatrix} \quad (20)$$

de tal forma que,

$$\begin{aligned} x_t &= x_0 + \int_{t_1}^t (v_0 + \int \dot{v}_t dt \cos(\theta_0 + Kr \int (\dot{\phi}_t^r - \dot{\phi}_t^l) dt) dt \\ y_t &= y_0 + \int_{t_1}^t (v_0 + \int \dot{v}_t dt \sin(\theta_0 + Kr \int (\dot{\phi}_t^r - \dot{\phi}_t^l) dt) dt \end{aligned} \quad (21)$$

La orientación final del vehículo θ_t se obtiene mediante la integración de la velocidad rotacional del vehículo en el intervalo $[t_0, t_n]$, en el cual la rotación de las ruedas es controlada en lugar de recolectar mediciones odométricas absolutas como se propone en otros enfoques.

$$\theta_t = \theta_0 + K \int_{t_1}^t (v_t^r - v_t^l) dt \quad (22)$$

Por lo tanto, en (23) se sintetiza el ángulo de dirección del vehículo integrando las velocidades angulares de las ruedas, dado que son directamente controlables y existe un modelo que gobierna dicha velocidad. Sin pérdida de generalidad, establecemos que el vector de posición $\mathbf{x}_t = (x_t, y_t)^T$ es calculado a partir de un modelo general que describe la suma de todos los desplazamiento del vehículo en el tiempo,

$$\begin{aligned} x_t &= x_0 + \int_{t_1}^t (v_0 + \int \dot{v}_t dt \cos(\theta_0 + Kr \int (\dot{\phi}_t^r - \dot{\phi}_t^l) dt) dt \\ y_t &= y_0 + \int_{t_1}^t (v_0 + \int \dot{v}_t dt \sin(\theta_0 + Kr \int (\dot{\phi}_t^r - \dot{\phi}_t^l) dt) dt \end{aligned} \quad (23)$$

Por lo tanto el vector de estado en términos de las velocidades se formula de la siguiente manera en (24),

$$\xi_t^r = \begin{pmatrix} \dot{x}_{t-1} \\ \dot{y}_{t-1} \\ \dot{\theta}_{t-1} \end{pmatrix} + \frac{r}{2} (\dot{\phi}_t^l + \dot{\phi}_t^r) \begin{pmatrix} \cos \left(\theta_0 + Kr \int_{t_1}^t (\dot{\phi}_t^r - \dot{\phi}_t^l) dt \right) \\ \sin \left(\theta_0 + Kr \int_{t_1}^t (\dot{\phi}_t^r - \dot{\phi}_t^l) dt \right) \\ \frac{W}{2(W^2 + L^2)} \left(\frac{\dot{\phi}_t^l - \dot{\phi}_t^r}{\dot{\phi}_t^l + \dot{\phi}_t^r} \right) \end{pmatrix}, \quad (24)$$

La ecuación (24) depende de la velocidad de las ruedas $\dot{\phi}_t^{l,r}$ en lugar de usar las velocidades tangenciales en los puntos de contactos con el suelo $v_t^{l,r}$. Esta consideración es razonable si para propó-

sitos de establecer un modelo de control de navegación en vehículos controlados por motores eléctricos mediante comandos de bajo nivel. Ahora, expresando el vector de estado en el plano global tenemos (25)

$$\xi_t^l = R(\psi_t) \xi_t^r = \begin{pmatrix} \cos(\psi_t) & -\sin(\psi_t) & 0 \\ \sin(\psi_t) & \cos(\psi_t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} \quad (25)$$

Así que (26) proyecta recursivamente la próxima posición deseada del vehículo el cual alcanza la posición $\mathbf{x}_{t+1} = (x_{t+1}, y_{t+1})^T$ proporcionalmente controlando la magnitud de la velocidad del vehículo la cual fluctúa cercanamente a la velocidad ideal. Finalmente, la próxima posición deseada se determina mediante (26),

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{x}_t + v_t \Delta t \begin{pmatrix} \cos(\theta_t) \\ \sin(\theta_t) \end{pmatrix} \quad (26)$$

PLANEACIÓN REACTIVA

El modelo generalizado para modelar campos direccionales repulsivos y atractivos se define en (27), de aquí en adelante el vector $\delta_{\mu\kappa} = \|\mathbf{x}_\mu - \mathbf{x}_\kappa\|$ representará la distancia entre el vehículo y un conjunto de obstáculos simbolizados por $\kappa = \alpha, \beta, \gamma$. La expresión (27) modela el campo potencial que genera fuerzas acelerativas de repulsión y son dadas por el vector \mathbf{f}_t^α .

$$\mathbf{f}_t^\alpha = -\nabla_{\delta_{\mu\alpha}} u_\alpha e^{-\|\delta_{\mu\alpha}\|/R} \quad (27)$$

El vehículo μ se desplaza evitando colisionarse con cualquier obstáculo α que sea detectado en una observación sensorial en tiempo t . Un coeficiente de aceleración u_α establece el parámetro de la fuerza relacionada a una magnitud, y su signo se determina si la fuerza es repulsiva o de atracción. Finalmente, R define la rapidez en la caída de la fuerza acelerativa entre un obstáculo y el vehículo. Desarrollando las derivadas parciales de acuerdo al operador gradiente se establece la siguiente función (28),

$$\mathbf{f}_t^{\mu\alpha} = u_\alpha \frac{e^{-\|\vec{\delta}_{\mu\alpha}\|/R}}{R\|\vec{\delta}_{\mu\alpha}\|} \begin{pmatrix} x_\mu - x_\alpha \\ y_\mu - y_\alpha \end{pmatrix} \quad (28)$$

La figura 2 muestra cuatro gráficas obtenidas a partir de experimentos de simulación de un vehículo aproximándose a un obstáculo. Se ilustra el comportamiento de las velocidades controlando el vehículo para evitar la colisión.

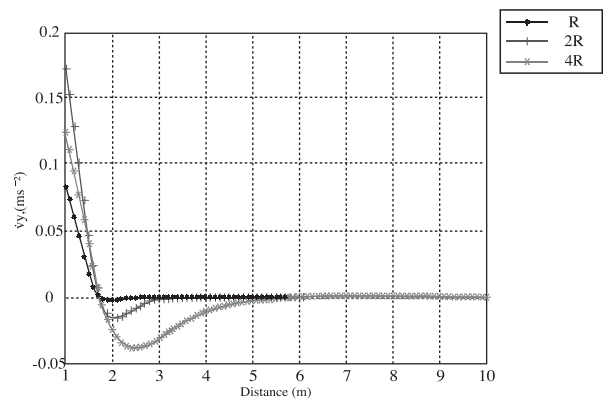
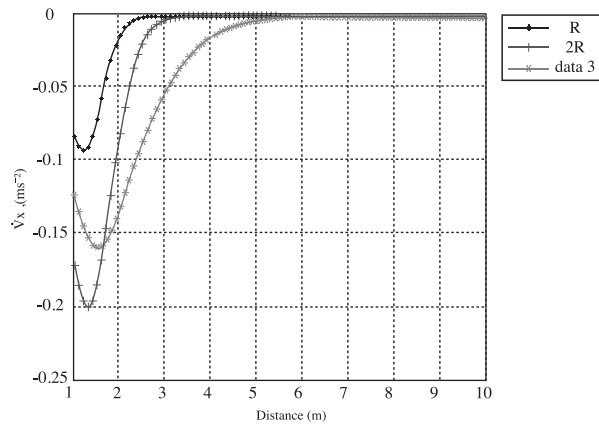
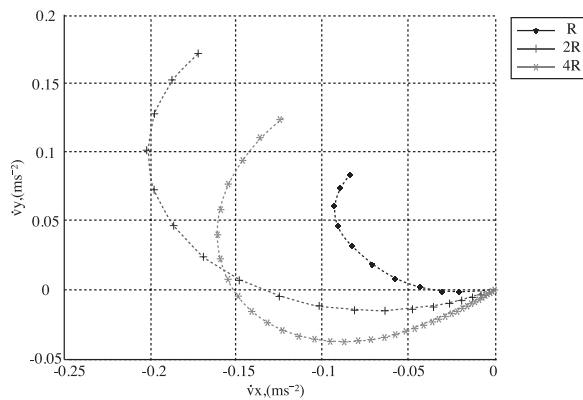
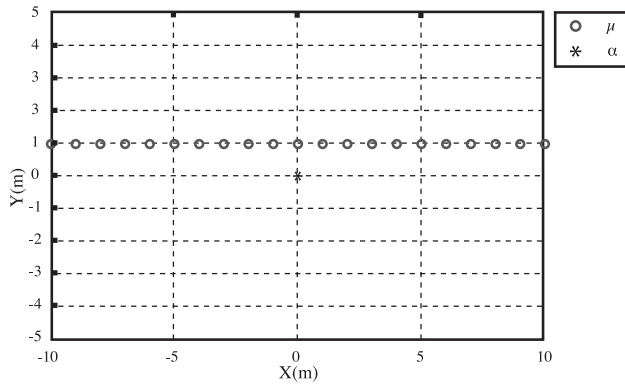


Figura 2: Componentes de aceleración repulsivas del vehículo μ hacia un objeto estático α . Inicialmente μ se localiza en la coordenada (10,1), y α en la coordenada (0,0).

Considerando las velocidades comúnmente desarrolladas en ambientes urbanos, y que las situaciones de colisión suelen ocurrir repentinamente, entonces campos repulsivos fuertes y con una pendiente acelerativa rápida se establecen mediante la ecuación general (29) para reacción ante objetos puramente dinámicos,

$$\vec{f}_t^{\mu\beta}(\vec{\delta}_{\mu\beta}) = -\nabla_{\delta_{\mu\beta}} u_{\mu\beta}^o e^{b(\vec{\delta}_{\mu\beta})/R} \quad (29)$$

Sin embargo, la distribución del potencial basada en Gauss puede ser ligeramente modificada inspirados en la ecuación del potencial de Yukawa (G. E. Brown, 1976), en el cual tal ecuación produce campos potenciales repulsivos de magnitud grande entre partículas atómicas interactuando muy cercanamente. El enfoque propuesto se aplica al presente contexto y se expresa en la siguiente ecuación (30),

$$\mathbf{f}_t^{\mu\beta} = -\nabla_{\delta_{\mu\beta}} u_\beta \frac{e^{-\|\vec{\delta}_{\mu\beta}\|/R}}{\|\vec{\delta}_{\mu\beta}\|} \quad (30)$$

Usando la ecuación (30) se puede generar un conjunto de curvas cuya característica común es la pendiente repulsiva de caída rápida con la distancia.

]=

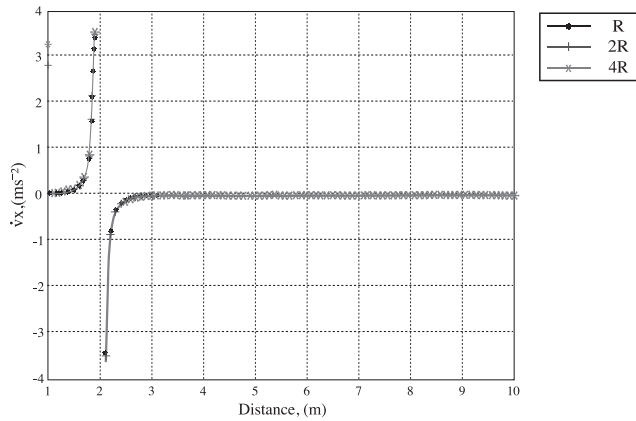
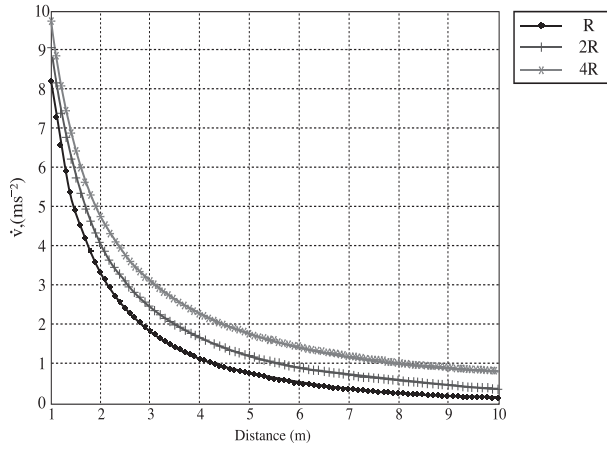


Figura 3: Aceleración repulsiva en objetos dinámicos. El vehículo μ se mueve hacia un objeto estático α . Inicialmente μ se localiza en la coordenada $(10,1)$, y α en $(0,0)$.

Aplicando el operador gradiente definido en (30), la derivada parcial respecto a x y y , resulta en la ecuación (31) cuyo vector de fuerzas se expresa por,

$$\mathbf{f}_r^{\mu\beta} = u_{\mu\beta} \frac{e^{-\|\bar{\delta}_{\mu\beta}\|/R}}{\|\bar{\delta}_{\mu\beta}\|} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\|\bar{\delta}_{\mu\beta}\|} \right) \begin{pmatrix} (x_\mu - x_\beta) / \|\bar{\delta}_{\mu\beta}\| \\ (y_\mu - y_\beta) / \|\bar{\delta}_{\mu\beta}\| \end{pmatrix} \quad (31)$$

El vehículo es atraído hacia un conjunto de metas, y las fuerzas acelerativas contribuyen a moverlo son las componentes del vector de potencial gama \mathbf{f}_γ . Se realizaron algunos experimentos de navegación y se recolectaron datos sensoriales en un ambiente urbano, obteniendo los resultados en figura 4 (derecha).

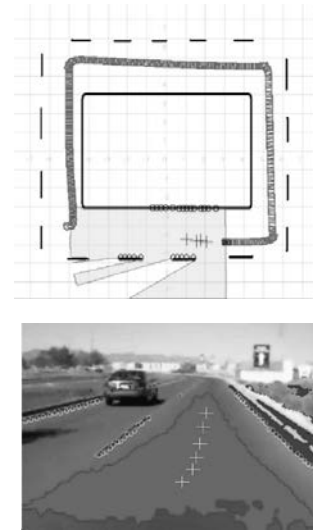


Figura 4: Sup: Robot móvil con un LIDAR detectando espacio libre (áreas de atracción). Inf: Experimentos con un vehículo usando visión para detección de las líneas bordes (círculos repulsivos F^r), y la ruta deseada (cruces como puntos de atracción F^a).

Control de velocidad

El modelo general produce una velocidad resultante, la cual es una velocidad controlada aproximada a una velocidad ideal,

$$\hat{\mathbf{v}}_t = \mathbf{v}_{t-1} + \eta \left(v_o \begin{pmatrix} \cos(\theta_t) \\ \sin(\theta_t) \end{pmatrix} - \mathbf{v}_{t-1} \right) \quad (32)$$

El factor $0 < \eta < 1$ es una ganancia constante que atenúa la velocidad lineal para converger alrededor de la velocidad ideal v_o . Simultáneamente, el vehículo no puede ser comandado de forma que exceda una velocidad máxima permitida, particularmente en el caso de cambios rápidos de aceleraciones (e.g. obstáculos dinámicos aproximándose a una colisión), por lo que (33) controla esas situaciones incluyendo a (32).

$$\mathbf{v}_t = \hat{\mathbf{v}}_t g(v_{\max}, \|\hat{\mathbf{v}}_t\|) \quad (33)$$

y el control del limite de velocidad se define como

$$g(v_{\max}, \|\hat{\mathbf{v}}_t\|) = \begin{cases} 1, & \|\hat{\mathbf{v}}_t\| < v_{\max} \\ v_{\max} / \|\hat{\mathbf{v}}_t\|, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (34)$$

CONCLUSIONES

Se presentó una combinación de un modelo que afecta el movimiento generalizado de una partícula (cg); y otro que modela las causas, internas y externas del vehículo. El enfoque propuesto incluye el análisis de las restricciones cinemáticas del vehículo en tiempo continuo para establecer una ecuación que modele la velocidad angular del vehículo en términos de sus medidas físicas, en lugar de asumir un valor, u obtenerla a partir de odometría, o mediante otra técnica de sensado inercial. El modelo cinemático de locomoción analizado no está limitado a un solo tipo de geometría, ya que se puede introducir cualquier otros tipo de restricciones cinemáticas. El esquema propuesto puede aceptar como entrada el vector de estado de la plataforma/vehículo, y es relativamente fácil de implementar, ofreciendo una solución práctica a un amplia variedad de escenarios dinámicos y problemas de navegación complejos. Adicionalmente, la ecuación del potencial produce aceleraciones de salida de magnitud considerable. Se muestran resultados de simulación y experimentales en relación a la información sensorial que combina percepción visual de la carretera y las líneas de los bordes, así como el uso de rastreos láser para detectar las distancias.

BIBLIOGRAFÍA

- D. Helbing and P. Molnar. "Social force model for pedestrians dynamics". *Physical Review E.*, vol. 51, pp. 4282, 1995.
- G. Campion, G. Baston and B. D' Andrea-Novel. "Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots". *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 12, No. 1, February 1996.
- D. Fox, W. Burgard and S. Thrun. "The dynamic window approach to collision avoidance". *IEEE Robotics&Automation Magazine*, Vol. 4, March 1997, pp. 23-33.
- R. Rocha, A. Cunha, J. Varandas and J. Dias. "Towards a new mobility concept for cities: architecture and programming of semi-autonomous electric vehicles". *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 34, No. 2, 2007, pp. 142-149.
- K. Macek, K. Thoma, R. Glatzel and R. Siewart. "Dynamics modeling and parameter identification for autonomous vehicle navigation". Proceedings 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007, pp. 3321-3326.
- Y. Koren and J. Borenstein. "Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation". Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, 1991, pp. 1398-1404.
- G. Antonelli and S. Chiaverini. "Linear estimation of the odometric parameters for differential-drive mobile robots". Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006, pp. 3287-3292.
- R. Benenson, S. Petti, T. Fraichard and M. Parent, "Integrating perception and planning for autonomous navigation of urban vehicles", Proc. of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 9-15, 2006, Beijing China, pp. 98-104.
- G. E. Brown and A. D. Jackson. *The Nucleon-Nucleon Interaction*. 1976, North-Holland Publishing, Amsterdam.

■ ARTÍCULO DE REVISIÓN

Proyecto N-derivadas en álgebras de Banach

Luis Gabriel Loeza Chin, Elifalet López González

RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo es describir los resultados obtenidos en el proyecto con financiamiento interno N-derivada en álgebras de Banach y dinámica de mapeos racionales holomorfos. En éste se introdujo la teoría necesaria para definir las ecuaciones diferenciales sobre álgebras asociativas, conmutativas con elemento unidad de dimensión finita.

Palabras clave: Teoría de funciones analíticas sobre álgebras, Ecuaciones diferenciales Ordinarias, Campos vectoriales.

INTRODUCCIÓN

Una ecuación diferencial ordinaria (EDO y EDOS en plural) de tiempo real se expresa de la forma $dx/dt=f(x)$, en donde f es una función con diferencial continua (ver [5], [7] y referencias que aparecen en éstos) definida en una región del espacio Euclidiano n -dimensional. Por ejemplo, una ecuación diferencial se puede representar geoméricamente como un campo vectorial; a cada punto p en la región de definición de f se le asocia el vector $f(p)$. Dar una solución de la ecuación diferencial $dx/dt=f(x)$ la cual cumpla una condición inicial dada significa encontrar una curva diferenciable que al

tiempo $t=0$ pase por la condición inicial y que sea tangente al campo vectorial dado. Las EDOS tienen aplicaciones tanto en Ingeniería como en la ciencia en general.

Las EDOS de tiempo complejo (ver [3]) se han introducido para estudiar a las de tiempo real. El objetivo del proyecto N-derivada fue desarrollar e investigar las herramientas de la Teoría de funciones analíticas sobre álgebras necesarias para introducir las ecuaciones diferenciales sobre álgebras.

En este trabajo álgebra significa álgebra asociativa, conmutativa con unidad de dimensión finita sobre los números reales o complejos. Estas álgebras se pueden ver como sistemas de números

que son extensiones de los números reales ya que contienen una copia de éstos y tienen aplicaciones, por ejemplo, en modelos del código genético.

ANTECEDENTES

Ecuaciones diferenciales ordinarias de tiempo real y complejo.

El estudio de las ecuaciones diferenciales de tiempo se remota a la época de Isaac Newton cuando se empezaron a utilizar modelando situaciones físicas. Desde entonces se ha desarrollado y se sigue desarrollando una amplia teoría matemática con el objetivo de entender el comportamiento de las soluciones de las EDOS. Por ejemplo, los sistemas dinámicos de tiempo continuo corresponden a ecuaciones diferenciales de tiempo real y en el desarrollo de la teoría correspondiente aparecen prácticamente todas las áreas de las matemáticas.

Existe una gran cantidad de preguntas sobre EDOS en los campos de las aplicaciones que permanecen sin responderse, aun para sistemas planares (sistema de dos ecuaciones diferenciales ordinarias de tiempo real). La complejificación de una EDO analítica (f analítica) de tiempo real nos conduce a una ecuación diferencial de tiempo complejo (ver [3]). Actualmente las EDOS de tiempo real ó complejo son temas de investigación activa a nivel internacional.

Teoría de funciones analíticas sobre álgebras.

En el proyecto [13] se inició en la UACJ con el estudio sobre derivadas en álgebras. Existe una teoría de funciones analíticas en álgebras, la cual se puede consultar en los artículos [2], [4] y [12] y las referencias que aparecen éstos. En ésta se extienden algunos resultados de la teoría de funciones analíticas complejas al contexto de álgebras, aparecen definiciones de derivadas en álgebras y un teorema integral de Cauchy pero no son las versiones más adecuadas para nuestros propósitos de introducir las ecuaciones diferenciales en álgebras. Con respecto a diferenciales de funciones entre módulos

sobre álgebras (ver [6]), no encontramos trabajos al respecto.

RESULTADOS

En el trabajo [8] aparecen ejemplos de álgebras de matrices y en [10] y [11] se dan otros ejemplos además de probarse, en estos últimos, que las funciones N -derivables en estas álgebras cumplen el teorema integral de Cauchy de variable compleja, (ver [1]). Este teorema es fundamental para definir las ecuaciones diferenciales sobre álgebras ya que en la prueba del teorema de existencia y unicidad de soluciones se hace a través de las iteradas de Picard y éstas se definen en términos de integrales de línea las cuales no deben depender del camino en una misma clase de homotopía. En los artículos [10] y [11] se dan sistemas de ecuaciones en derivadas parciales las cuales son del tipo Cauchy-Riemann, como en el caso de las ecuaciones de Cauchy-Riemann de variable compleja.

En el trabajo [9] se explica por qué es más conveniente, para nuestros propósitos, usar otro concepto de diferenciabilidad en álgebras, que es el que aparece en [12], en lugar del de N -derivada. Aunque el estudio de la N -derivada resultó muy útil; mediante este concepto es fácil darse cuenta que las funciones polinomiales, racionales, trigonométricas, exponenciales y las que se obtengan de estas mediante operaciones de suma, producto, y la composición de funciones, son diferenciables con respecto a ambos conceptos de diferenciabilidad, además las derivadas cumplen las reglas usuales de diferenciación. Esto nos sugiere lo siguiente:

1. Utilizar a las ecuaciones diferenciales en álgebras para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales reales; en esta dirección se está trabajando, se busca proponer un método de solución de sistemas de EDOS reales.
2. Utilizar a las ecuaciones diferenciales en álgebras para extender, a sistemas más grandes, un método de visualización global de soluciones, que existe para sistemas en el

plano cuando el campo f es analítico. Aun en el caso de sistemas en el plano, el uso de álgebras nos permite considerar una clase más amplia de campos. Este método tiene ventajas sobre los métodos numéricos; éstas se manifiestan al considerar campos vectoriales alrededor de puntos donde el comportamiento es caótico, por ejemplo, alrededor de singularidades esenciales de f cuando f es analítica compleja.

3. Introducir los espacios proyectivos de módulos sobre álgebras y las ecuaciones de Riccati generalizadas.
4. Dar un teorema general de existencia y unicidad de soluciones de ecuaciones diferenciales sobre álgebras.

En los cuatro puntos anteriores se están desarrollando trabajos por investigadores de la UACJ en las que participan investigadores de la UABC, UNISON y UMSNH, y se están incorporando otros colaboradores.

Además de la divulgación que se ha hecho en la UACJ a través de un seminario semanal de ecuaciones diferenciales y sistemas dinámicos, se han presentado las siguientes ponencias:

1. Ecuaciones de Riccati generalizadas, en el Congreso Nacional de Matemáticas 2008.
2. Ecuaciones diferenciales de tiempo multi-dimensional, en un Seminario de Sistemas Dinámicos del IFM de la UMSNH en noviembre de 2008.
3. Differential equations over algebras, en un Encuentro internacional de sistemas dinámicos celebrado en la UABC-Ensenada Baja California México, en julio de 2009.

CONCLUSIONES

El proyecto N-derivada es un primer paso en la investigación de ecuaciones diferenciales sobre álgebras ya que:

1. El proyecto N-derivada da las bases para un método de solución de sistemas de ecuaciones diferenciales. Se cuenta con avances en esta dirección.
2. Dado que se cumplen las reglas usuales de diferenciación para las funciones elementales en álgebras podemos generalizar las técnicas (que ya existen) de visualización de curvas fase de sistemas analíticos en el plano.
3. Se han incorporando al estudio de ecuaciones diferenciales sobre álgebras investigadores de otras universidades nacionales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ahlfors, L. V. (1979) *Complex Analysis*. McGraw-Hill International Book Company.
- [2] Blum, E. K. (1955). "A theory of analytic functions in Banach algebras". *Trans. Amer. Math. Soc.* vol. 78, No. 2. pp. 343-370.
- [3] Coddington, Earl A. y N. Levinson (1984). *Theory of Ordinary Differential Equations*. Krieger Pub. Co.
- [4] Ketchum, P. W. (1928). "Analytic functions of hypercomplex variables". *Trans. Amer. Math. Soc.* vol. 30, No. 4. pp. 641-667.
- [5] Faya, J. (2008). *Sobre tres generalizaciones del concepto de derivada*. CBE-IIT, UACJ.
- [6] Gómez, A. (2008). *Diferencial en Módulos*. Proyecto de titulación. CBE-IIT, UACJ.
- [7] Kreyszig, E. (1989). *Intoductory Functional analysis with applications*, Wiley; 1 edition.
- [8] López, E., Antolín, F., Tapia, G. (2009). *Ejemplos de álgebras de Matrices*. Por publicarse en las primeras memorias del seminario de Ecuaciones diferenciales y sistemas dinámicos, CBE, IIT-UACJ.
- [9] López, E., Antolín, A., Tapia, G., Loeza, L. (2008). "N-derivada en álgebras de Banach". *Memorias de la Decimocuarta Semana y Primer Congreso Internacional de Ingeniería y Tecnología*, IIT-UACJ.

- [10] López, E., Carrillo, V., Terrazas, S., (2008). “Sobre la integral de línea en un álgebra de dimensión real 2 que no son los complejos”. *CULCyT*, mayo-Junio de 2008. Año 5, No 26.
- [11] López, E., Terrazas, S., Carrillo, V. (2009). “Campos conservativos en un álgebra conmutativa unitaria de dimensión real 3”. *CULCyT*, Enero-Febrero de 2009. Año 6, No 30.
- [12] Lorch, E. R. (1943). “The theory of analytic functions in normed abelian vector rings”. *Trans. Amer. Math. Soc.* vol. 54, No. 3. pp. 414-425.
- [13] Serrano, I. (2007). *Algunas reglas de derivación para la derivada newtoniana generalizada*. Proyecto de titulación. CBE-IIT, UACJ

■ ARTÍCULO DE REVISIÓN

Historia y resultados del Programa de Intercambio de Información entre México y Estados Unidos referente a la temática de agua subterránea: caso de la región Paso del Norte (Chihuahua-Nuevo México-Texas)

Alfredo Granados Olivas¹, Erick Sánchez Flores², Hugo Luis Rojas Villalobos²,
Javier Chávez², John Hawley³, Bobby Creel³

RESUMEN

Las universidades públicas mexicanas desarrollan investigación aplicada en diversas áreas de la ciencia buscando alternativas de solución a variadas problemáticas. En el caso particular de las universidades de la zona fronteriza entre México y Estados Unidos, se presentan alternativas de investigación contando con ventajas competitivas con respecto a las universidades del interior de México. En la UACJ se ha tomado la delantera de esta ventaja competitiva siendo exitosos en el concurso por recursos para la investigación aplicada generando redes de investigación con pares académicos estableciendo compromisos y agendas de trabajo permitiendo el desarrollo científico de estas áreas y de sus participantes. En este artículo se plantea la experiencia obtenida en los estudios de Aguas Subterráneas Transfronterizas y su impacto en el desarrollo urbano de las comunidades binacionales que comparten el recurso agua en la Región Paso del Norte (Chihuahua-Nuevo México-Texas). Se presentan datos de disponibilidad y volúmenes potenciales de agua subterránea en los tres acuíferos principales de la región en cuestión y se exponen alternativas para un desarrollo urbano sustentable. Estos datos son de relevancia pues las alternativas de inversiones económicas en la región, dependen de la disponibilidad del recurso agua a mediano y largo plazo.

Palabras clave: Acuíferos Transfronterizos, Desarrollo Sustentable Holístico, Cuenca, Geobase de Datos, Pares Académicos.

¹ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental-IIT

² Departamento de Arquitectura-IADA

³ New Mexico Water Resources Research Institute

agranados@uacj.mx; esanchez@uacj.mx; hlorojas@uacj.mx; jchavez@uacj.mx; hgeomatters@qwestoffice.net ; bcreel@wrri.nmsu.edu

INTRODUCCIÓN

Históricamente, México y Estados Unidos han compartido información entre instituciones y pares académicos en relación a la región fronteriza y referente a diferentes temáticas para el beneficio de ambos países. Información concerniente a las características de los recursos naturales, de aspectos socio-económicos, de la dinámica fronteriza, de infraestructura urbana y rural, y de aspectos de índole a la seguridad nacional de ambos países, entre otras temáticas.

Sin embargo, en lo referente al intercambio de información relativa a los recursos naturales, aspectos relativos a la escala de las bases de datos, las unidades utilizadas para su clasificación, el idioma, los sistemas de identificación y clasificación taxonómica, y la resolución temporal para el monitoreo de estos inventarios de recursos naturales, han sido áreas de oportunidad para su desarrollo. Por ejemplo, la información de México referente a los recursos de agua subterránea es limitada y no actualizada en las zonas rurales limitando su aplicación y uso en estudios detallados de la dinámica de redes de flujo o en su evolución piezométrica e hidrogeoquímica, (INEGI, 1999; INEGI, 1982).

Por otro lado, en las áreas urbanas de la zona fronteriza en donde se concentran poblaciones numerosas, el monitoreo es puntual y permanente pero el análisis de su extensión geoespacial en el territorio es limitado pues sólo cubre porcentajes mínimos del total de extensión geoespacial de los acuíferos, tal es el caso de los acuíferos transfronterizos de la región de Conejos-Médanos en el área conurbada de Ciudad Juárez, Chihuahua, (Jurado, 2008). Aun cuando se ha realizado investigación continua de estos sistemas acuíferos transfronterizos por parte de la comunidad científica internacional, existe todavía la creciente necesidad de análisis e interpretación de esta información, a pesar de la extensiva documentación que se ha realizado de los estudios publicados a través del tiempo por las diversas redes de investigadores en hidrogeología, (Hawley y Granados, 2008). Más importante aún

es el hecho de que estos sistemas acuíferos son en su totalidad binacionales en su extensión territorial encontrando su delimitación geoespacial en los partaguas de las cuencas, las cuales se extienden en la línea fronteriza entre ambos países comprometiendo la necesidad de un mejor entendimiento de los sistemas físico-geográfico para poder proponer las alternativas para un manejo binacional sustentable y holístico de los recursos de agua (ambos subterráneas y superficiales) entre ambos países. De tal forma que, para poder iniciar una relación oficial para sentar las bases de la identificación y caracterización de los recursos de agua con un reconocimiento binacional entre ambos países, se requiere de una geobase de datos binacional que integre los parámetros, escalas, clasificaciones y metodologías que permitan sentar esta plataforma para el entendimiento de la disponibilidad de los recursos de agua entre ambos países.

ANTECEDENTES

Para poder lograr este objetivo, se requiere terminar de complementar una serie de aspectos preliminares antes de iniciar con el ejercicio binacional de sentarse en una mesa redonda con representantes de ambos países y discutir cómo se administrara un recurso de vital importancia y estratégico en el desarrollo de ambos países. Por ejemplo, el retraso en la actualización de información en referencia al agua subterránea de parte de México es considerable. Por ejemplo, la información piezométrica referente a la evolución de los niveles de agua subterránea y la evolución temporal de la calidad de agua subterránea en la región de estudio, así como la actualización de un hidrocenso (referente a ¿Quién? ¿Cómo? y ¿En dónde? utiliza el agua autorizada vía permisos de explotación) que permita identificar las baterías de pozos profundos de monitoreo, son prioridades las cuales no se puede postergar su realización en estos acuíferos transfronterizos por parte de los administradores del recurso y los tomadores de decisión, (Granados *et al.*, 2006). Por el otro lado, la información referente a aguas sub-

terráneas en acuíferos transfronterizos en la región de Estados Unidos, aun cuando la información existente es más completa, actualizada y fehaciente, en la cual participan diversas agencias de gobierno en la administración de la misma asignando presupuestos y partidas económicas para el desarrollo continuo y programado para la generación de esta información, integrando en el desarrollo de la misma a la comunidad académico-científica regional, existe aún la necesidad de mayor investigación aplicada en este rubro debido a que se conoce poco en relación a la evolución hidrodinámica de estos sistemas acuíferos binacionales, (Montes, 2008; Creel, 2007; McHugh, 2005).

Aun cuando existen estas discrepancias en las geobase de datos referente a la temporalidad de la generación de la información y en los niveles de asignación presupuestal para la investigación del recurso de agua subterránea entre ambos países, las agencias e instituciones estadounidenses se han beneficiado mayormente de estos esfuerzos de intercambio de información que las instituciones mexicanas. Reportes referentes a la delineación de acuíferos transfronterizos, del modelado hidrogeológico y de la evolución hidrogeoquímica de estos sistemas de agua subterránea transfronterizos en la Región Paso del Norte, han sido publicados por diferentes agencias y programas de investigación desarrollados por pares académicos a lo largo de la franja fronteriza en la región de interés, (Eastoe, *et al.*, 2008; Hawley y Granados, 2008; Hutchinson *et al.*, 2008; Granados *et al.*, 2006; Hibbs *et al.*, 2003; Hibbs, 1999).

A pesar de que esfuerzos de investigación aplicada se han desarrollado para el intercambio de información georeferenciada referente a agua subterránea y otros recursos naturales, muchos de estos estudios en México han sido a escalas pequeñas (ejemplo: 1:250,000), localizadas en zonas principalmente urbanas (ejemplo: área urbana de Ciudad Juárez, Chih.) y a nivel cuenca hidrológica (ejemplo: Cuenca Mimbres-Los Muertos), en donde se ha generado información binacional y se intercambia-

biado de manera oficial bases de datos, (Hawley y Granados, 2008; Eastoe, *et al.*, 2008; Creel, 2007; Tillery *et al.*, 2006; Granados-Olivas y Corral-Díaz, 2003). Estos esfuerzos han traído luz a las diversas incógnitas referentes a la dinámica del agua subterránea y a reducir la insuficiencia de información científicamente validada para la región binacional la cual haya sido integrada en un formato de Sistemas de Información Geográfica (SIG), incorporando geobases de datos referentes a los recursos naturales generando cartografía temática binacional de inventarios referentes a: geología, suelos, geomorfología, usos del suelo, cobertura vegetal, e hidrología entre otros tópicos, (Granados *et al.*, 2006; Tillery *et al.*, 2006; Brown *et al.*, 2005).

DESARROLLO DEL TEMA

De esta extensa colaboración binacional desarrollada a través de los intercambios de investigación generados por la red de hidrogeólogos de la Región Paso del Norte, varias evaluaciones complementarias de los potenciales hidrogeológicos regionales se han desarrollado por diversas agencias, principalmente en los Estados Unidos. Por ejemplo, la oficina de El Paso Water Utilities (EPWU), par similar a lo que es la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) de Ciudad Juárez, ambas responsables del suministro y administración del recurso agua y del saneamiento de las mismas, han desarrollado modelos binacionales de la dinámica de flujo de las aguas subterráneas en la Región Paso del Norte, aplicando programas computacionales especializados en el modelaje tridimensional del sistema acuífero del Bolsón del Hueco (zona Cd. Juárez, Chih-El Paso, TX- Sunland Park, NM), los cuales se basaron en el intercambio de la información necesaria para desarrollar dichos modelos, siendo éstos limitados en su extensión territorial concentrándose en la mancha urbana de esta metrópoli binacional, (Hutchinson and Hibbs, 2008).

Este modelo local ha permitido entender las características binacionales de los sistemas de agua subterránea en la región ayudando en la planeación

estratégica para la sustentabilidad del recurso agua, lo que ha sido siempre un reto para las autoridades y responsables de la administración eficiente del agua, así como para la comunidad científica internacional. Aun cuando estos esfuerzos binacionales han sido exitosos en su implementación y han generado valiosa información para ambas agencias responsables de la administración del recurso, la parte mexicana ha sido menos agresiva en darle continuidad a esta importante información dejando en la agenda pendiente la generación de Sistemas Inteligentes de Toma de Decisión (Decision Support Systems-DSS, por sus siglas en inglés) los cuales pudieran dar soporte a una agenda continua de evaluación y monitoreo de los recursos de agua subterránea disponibles. Por ejemplo, examinar la evolución de la salinidad del acuífero por efectos de la sobreexplotación en la sección mexicana del acuífero, es una necesidad impostergable la cual, pudiera ser analizada con estas herramientas de modelado y principalmente con el monitoreo continuo para actualizar dichas bases de datos aplicando la información provista por parte de la sección estadounidense y basado en el modelado binacional de los flujos de agua subterránea en la zona de estudio.

Sin embargo, otras aplicaciones de esta información binacional compartida se han tomado en consideración por parte de los técnicos mexicanos de estas dependencias de gobierno al modelar la evolución piezométrica de los niveles de agua subterránea, al monitorear de manera localizada la evolución de la calidad química del agua en algunos puntos de la ciudad y al utilizar la información como calibración en pequeñas áreas para modelos geofísicos de la estratigrafía del paquete sedimentario del acuífero del Bolsón del Hueco, (Rascón, 2008). Existen otras agencias de gobierno responsables de la administración binacional del agua y de su sustentabilidad en estas cuencas binacionales. Tal es el caso de la Comisión Internacional de Límites y Agua (CILA) para la jurisdicción binacional y la Comisión Nacional del Agua (Conagua) para el nivel federal, la cual es responsable para to-

dos los aspectos referentes al agua en México. Para el caso de la CILA, esta oficina ha hecho uso de la información para la toma de decisiones la cual fue generada en foros técnicos y congresos especializados en la temática, tal es el caso de las publicaciones binacionales referentes a los recursos de agua a lo largo de la región del Bolsón del Hueco, (Hibbs *et al.*, 1997).

Sin embargo, aun cuando la posible utilidad en México de estos estudios e información probada por la comunidad científica internacional, la misma ha sido tímidamente utilizada por las diversas agencias de gobierno responsables de la administración del agua para la toma de decisiones o como DSS para la administración sustentable del agua subterránea, (Rascón, 2008; Reyes, 2008; Soto-Vega, 2008). Más preocupante aún es el hecho de que el nivel científico de los documentos técnicos publicados por estas agencias responsables de la administración eficiente del agua dista mucho de contar con las características de una publicación científica arbitrada limitándose a lo que son la mayoría de ellos, “reportes técnicos internos” muy generales y de poca escala resolutive que pudiera permitir la evaluación sustancial de las condiciones de los recursos de agua subterránea en el territorio nacional, siendo limitados en resolución espacial y temporal inhibiendo el análisis profundo de la información, siendo restringidos como reportes internos sin acceso público a dicha información, (Chávez *et al.*, 2006; INEGI 1999). Por ejemplo, Chávez y otros autores (2006), han estimado que el total de acuíferos existentes en el país es de aproximadamente 650, siendo éstos clasificados en base al nivel de estrés presentado por los sistemas acuíferos y considerando la evaluación del volumen de explotación en los mismos.

Estos autores han estimado que más de 100 de estos acuíferos están sobreexplotados y requieren de acciones de políticas públicas basadas en la sustentabilidad del recurso y de una administración eficiente del recurso de agua subterránea existente. Aun sin embargo, encontraron también que la me-

todoología aplicada por la autoridad para estimar la disponibilidad de agua subterránea en estos acuíferos “sobre explotados” fue basado en: las estimaciones de recarga anual a los sistemas; en el cálculo de la disponibilidad; y lo más importante, en los permisos de explotación del recurso en los acuíferos en consideración.

Con la mínima supervisión que la autoridad ejerce sobre el recurso en estos acuíferos y en base a los volúmenes reales de explotación por parte de los usuarios, principalmente en zonas rurales y en pequeñas poblaciones, se conoce que existen más pozos de bombeo en explotación que los autorizados y que en la mayoría de estos alumbramientos, principalmente en los de uso rural, los volúmenes de explotación por lo general no son aforados, siendo posible el hecho de que se pudiera o no estar extrayendo más agua de la actualmente autorizada. Esto último arrojaría los cálculos de balance hidrológico a un espacio de indefinición haciendo difícil las estimaciones de estado de equilibrio en los sistemas acuíferos dejando estas últimas estimaciones cuestionables y en completa desventaja para poder definir a ciencia cierta si algún sistema acuífero se encuentra o no sobreexplotado por los usuarios del recurso, siendo estos de zonas rurales para usos agrícolas o de otros usos, debido a que los cálculos oficiales de sobreexplotación se realizan en base a los volúmenes autorizados en los permisos de explotación escritos en papel y no son en su mayoría, monitoreados físicamente en campo en donde se encuentra la actual explotación. Los resultados pudieran ser para ambos lados, debido a que muchos de los usuarios del agua, principalmente los del sector rural, no bombean en su totalidad los volúmenes autorizados, para lo cual, una alternativa de estudio para monitoreo pudiera ser en base a tecnologías de sensores remotos, al realizar desde plataformas satelitales y monitorear las áreas de cultivo anual en los diversos distritos de riego, correlacionando el tipo de cultivo, la productividad del mismo y las estimaciones aproximadas de evapotranspiración.

En relación a los niveles de compromiso de colaboración binacional entre las instituciones de gobierno Mexicanas responsables de la administración del agua, se puede decir que la continuidad y el seguimiento de los diversos proyectos está limitada a la disponibilidad de recursos económicos y humanos disponibles entre las diversas instituciones comprometidas con la generación y actualización de esta información, estando sujeta a los diversos cambios de gobierno en los niveles federal, estatal y municipal. Las diversas actividades y las agendas de gobierno impuestas por los funcionarios limitan a los cuerpos técnicos especializados dentro de las dependencias, ajustándose a lo que el funcionario en turno considera que es prioridad, dejando por un lado los posibles programas existentes a largo plazo, principalmente los de monitoreo y estudios científicos, teniendo que atender las nuevas agendas impuestas.

Asimismo, la responsabilidad de proveer del vital líquido a las poblaciones atendidas, concentra el máximo esfuerzo de las áreas técnicas de estas dependencias concentrándose en “mantener” el sistema de agua funcionando dejando poco o nada de tiempo para el desarrollo de investigación aplicada, que en su defecto pudiera proveer información y dar luz a muchas de las problemáticas que se presentan en el diario desarrollo de las agendas de trabajo en las diversas áreas de las dependencias del agua en México.

Sin embargo, existen esfuerzos extraordinarios de algunas dependencias locales que han realizado importantes estudios para la caracterización de acuíferos locales en la región Paso del Norte. Tal es el caso del Departamento de Geohidrología de la JMAS, en Ciudad Juárez, los cuales han logrado desarrollar modelos de la estructura estratigráfica del paquete sedimentario de acuíferos locales como el de Conejos-Médanos y el del Bolsón del Hueco, llegando a definir la profundidad del estrato y la extensión de algunos de los segmentos de acuífero semi-confinado, lo que permitirá hacer planeación estratégica para el desarrollo sustentable de

la mancha urbana actual y para nuevos desarrollos planeados en cuencas aledañas de la región. Otro ejemplo de éxito y trabajo integrado con reducidos recursos y sin contar con áreas exclusivas para el desarrollo de la investigación aplicada, son los proyectos de Geohidrología e Hidrogeoquímica en presente desarrollo, los cuales han generado datos en el Bolsón del Hueco que han sido presentados en artículos arbitrados por pares de investigación científica en la Asociación Mexicana de Geohidrología, (Rascón, 2008).

Otros ejemplos de éxito desde el ámbito académico son identificados para la región como lo son los estudios realizados por parte de técnicos de la JMAS, estudios que fueron presentados como parte de la currícula requerida para obtener posgrados en la UACJ en las áreas de aguas subterráneas. Estos estudios demuestran la historia de los esfuerzos en conjunto realizados por personal de la JMAS y la UACJ logrando la vinculación de esfuerzos para bienes comunes, demostrando que las ideas de intercambio de información no son nuevas y que los esfuerzos de intercambio de información se han realizado desde décadas atrás (por ejemplo, los primeros ejercicios al respecto se iniciaron desde 1960), considerando que siempre se contará con mejor y más actualizada información, (Canizales, 1999; Lemus, 1999; Herrera, 1999).

Sin embargo, asuntos políticos, la carencia de continuidad y otros aspectos técnico-presupuestales, han truncado dichos esfuerzos limitándolos solo a iniciativas de buena voluntad entre las partes. De igual forma, experiencias pasadas han demostrado lo complejo que han sido los acuerdos binacionales para ambos gobiernos debido a que siempre es necesaria más información al respecto de la evolución de los recursos de agua para alcanzar acuerdos binacionales con relación a la administración del recurso transfronterizo de agua, (Van Schoik, 2003). Sin embargo, se requieren muchos más esfuerzos para complementar las deficiencias en investigación y es recomendable que estas dependencias establezcan áreas específicas

exclusivas para el desarrollo de la investigación y poder complementar en el entendimiento de estos sistemas que contienen un recurso estratégico para el desarrollo transfronterizo regional sustentable, como lo es el agua.

CONCLUSIONES

En conclusión, se puede argumentar que la historia y resultados del intercambio de información en asuntos relacionados a los recursos transfronterizos de agua subterránea han sido esfuerzos intermitentes entre los gobiernos de México y Estados Unidos y sus respectivas agencias responsables de la administración del recurso. Es también comprensible el hecho de que ambos países consideran al recurso agua como uno de estrategia e indispensable para la planeación del desarrollo sustentable de los países, ubicándolo como una parte importante para su sustentabilidad, sin perder de vista que este es un recurso compartido entre ambas naciones. Al respecto de la generación de información, es importante exponer que mientras los métodos, tecnologías y herramientas utilizados para generar información referente al recurso agua cambian constantemente, estos instrumentos son dinámicos y se renuevan a mayor velocidad que la toma de decisiones administrativas de las dependencias de gobierno, principalmente en las dependencias de gobierno mexicanas, por lo que la adaptación de nuevas tecnologías es lenta.

Esto es de relevante importancia porque en la medida en que estemos homologados entre ambos países en referencia a las bases de datos que se utilizan para la toma de decisiones y en la medida en que entendamos extensamente el sistema desde la perspectiva físico-geográfica (respondiendo a cuestionamientos como: ¿cuánta agua existe en estos acuíferos? y ¿en dónde se localiza?), en esa misma medida y con esa agenda de tiempo, podremos llegar a consensos en lo referente a la administración eficiente de los recursos de agua transfronterizos entre ambos países.

De igual forma, es necesario para el estado de

Chihuahua crear lo que se denomina el “Centro de Estudios del Agua” en donde se alberguen los planes y proyectos de investigación que permitan responder a los cuestionamientos anteriores definiendo la filosofía de trabajo de dicho centro con una aproximación holística en defensa del recurso agua en las zonas fronterizas entre los países, estados y municipios.

BIBLIOGRAFÍA

- Brown, C., A. Granados, J. Greenlee, and B. Hurd. 2005. “Usos de las Sistemas de Información Geográfica para Examinar la Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos Regionales en la Frontera de México y los Estados Unidos,” a paper presented at the XVII Semana Internacional de Agronomía, la Universidad Juárez del Estado del Durango, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Gomez Palacio, México. 9 September 2005. ISBN: 968-6404-90-2. Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agronomía y Zootecnia
- Canizales Sáenz, José Manuel, 1999. Evaluación hidrogeológica del acuífero en la zona suroriente de Ciudad Juárez, Chih., México. Tesis presentada en requerimiento parcial para obtener el grado de Maestría. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Maestría en Ingeniería Ambiental y Ecosistemas. Cd. Juárez, Chihuahua. Mayo, 1999. 86 paginas.
- Chávez Rodríguez , Adolfo, 2008. Uso Sustentable del Agua: Conceptos, Procedimientos y Riesgos. En Primer Foro del Agua-Chihuahua: “Hacia una política de conservación y aprovechamiento”. Panel I. Gestión Moderna y Estudios de los Recursos Hídricos. 10 Y 11 de Abril 2008. Centro de Convenciones y Exposiciones de Chihuahua.
- Chávez, R., Lara, F., and Sencion, R., 2006. *El Agua Subterránea en México: condición actual y retos para un manejo sostenible*. Boletín Geológico y Minero, 117 (1): 115-126. ISSN: 0366-0176. Enero-Marzo, 2006.
- Creel, Bobby J., John W. Hawley, John F. Kennedy, Alfredo Granados-Olivas, 2006. “Groundwater Resources Of The New Mexico-Texas-Chihuahua Border Region”. *New Mexico Journal of Science*. Vol. 44, August 2006. New Mexico Academy Of Science, 2006. Pag. 1-19.
- Creel, Bobby; J.F. Kennedy; Alfredo Granados-Olivas; Raed Aldouri; Randy Keller; 2002. Creating a single map: Regional Geographic Information System to support water planning in the Paso del Norte Region. Prepared for The Paso del Norte Water Task Force by New Mexico Water Resources Research Institute. Technical Completion Report No. 322. May, 2002.
- Granados-Olivas, Alfredo, 2008. Las Herramientas Técnicas de la Gestión del Agua. Primer Foro del Agua-Chihuahua. “Hacia una política de conservación y aprovechamiento”. Panel I. Gestión Moderna y Estudios de los Recursos Hídricos. 10 Y 11 de Abril 2008. Centro de Convenciones y Exposiciones de Chihuahua.
- Granados-Olivas, Alfredo; Chris Brown; Ms. Janet Greenlee; Bobby Creel; John Hawley; John Kennedy; Oscar Dena-Ornelas; Brian Hurd, 2006. Geographic Information Systems at the Paso del Norte Region. The Academic Accomplishments and Challenges for a Transboundary Water Resources GIS Cooperation. *New Mexico Journal of Science*. Vol. 44, August, 2006. New Mexico Academy Of Science, 2006. Pag 59-70.
- Granados-Olivas, Alfredo and Rafael Corral-Díaz, 2003. Fracture trace and alignment analysis for groundwater characterization on a non-karst arid environment in the Chihuahuan Desert, México. *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions*. IAHS Publication no. 278/ISSN 0144-7815/ISBN 1-901502-12-0, Pp.24-28. International Association of Hydrological Sciences, Montpellier, France, April, 2003.
- Granados-Olivas, Alfredo, 2003. The Mexico and U.S.PasodelNorteRegion:ChallengesTowards a Common Future for Water Resources. *Water*

- Security in the 21st Century. 2003 UCOWR Conference, Washington, D.C., University Council On Water Resources (UCOWR). The National Institutes for Water Resources and the Environmental & Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers.
- Granados, A.; Creel, B.; Kennedy, J.F., and Aldouri, R., 2002. Water Planning GIS for the Paso del Norte Región in First Internacional Symposium on Transboundary Waters Management Proceedings. *Avances en Hidrología 10*. Editors: A. Aldama, F.J. Aparicio, R. Equihua. Asociación Mexicana de Hidráulica. Monterrey, N.L., México, Noviembre, 2002. ISBN 968-5536-08-2. pp.147-154
- Hawley, John W., and Granados-Olivas, Alfredo, 2008. Progress Report on Development of an Annotated Bibliography For Transboundary Aquifer Systems of The Mesilla Basin-Paso del Norte Area, New Mexico, Texas (USA), And Chihuahua (MEX). NM Water Research Symposium, Socorro, New Mexico August, 12, 2008.
- Herrera Mercado, Juan Manuel, 1999. Características hidráulicas del acuífero del Bolsón del Mesilla para su explotación como fuente de abastecimiento. Tesis presentada en requerimiento parcial para obtener el grado de Maestría. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Maestría en Ingeniería Ambiental y Ecosistemas. Cd. Juárez, Chihuahua. Mayo, 1999. 78 paginas.
- Hutchinson, William R. and Hibbs, Barry J., 2008. Ground Water Budget Analysis and Cross-Formational Leakage in and Arid Basin. *Ground Water Journal*. Volume 46, No. 3 pp. 384-395, May-June, 2008. *Journal of the Association of Ground Water Scientists and Engineers*. Pages 384-395. ISSN 0017-467X (print) 1745-6584 (online).
- Hibbs, B., Phillips, F., Hogan, J., Eastoe, C., Hawley, J., Granados, A., and Hutchison, B., 2003, Hydrogeologic and Isotopic Study of the Groundwater Resources of the Hueco Bolson Aquifer El Paso/ Juárez Area: Hydrological Science and Technology, v. 19, (1-4), p. 109-119.
- Hibbs, B.J., 1999, Water quality and hydrogeologic issues along the City of El Paso/Ciudad Juárez corridor - international case study: *Environmental & Engineering Geosciences*, v.5., no.1, p 27-39.
- Hibbs, B.J., R.N. Boghici, M.E. Hayes, J.B. Ashworth, A.T. Hanson, Z.A. Samani, J.F. Kennedy, and B.J. Creel. 1997. *Transboundary Aquifers of the El Paso/Ciudad Juárez/Las Cruces Region*, Texas Water Development Board and New Mexico Water Resources Research Institute, October 1997. 155 p.
- INEGI, 1999. Estudio Hidrológico del Estado de Chihuahua. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y Gobierno del Estado de Chihuahua. 222 pag. ISBN: 970-13-2077-8
- INEGI, 1982. Carta de Aguas Subterráneas, H13-1, Escala 1:250,000.
- Jurado Márquez, Miguel Ángel, 2008. Proyecto Integral de Agua y Saneamiento para Ciudad Juárez. Power Point presentation given as President of the Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS) del Gobierno del Estado de Chihuahua at the Water Forum in Ciudad Juárez, Chih., May, 2008.
- Lemus Sánchez, Ranulfo, 1999. Abastecimiento del sistema de agua potable de Ciudad Juárez, Chihuahua. 1920-1998. Tesis presentada en requerimiento parcial para obtener el grado de Maestría. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Maestría en Ingeniería Ambiental y Ecosistemas. Cd. Juárez, Chihuahua. Junio, 1999. 86 paginas.
- McHugh, Rachel, 2005. Federal aquifer bill would help calm down troubled U.S.-Mexico Border Waters. Americas Program (Silver City, NM: International Relations Center. March 21, 2005.) IRC Americas. A new World of Analysis, Ideas and Policy Options. www.americaspolicy.org
- Montes, Mario A., 2008. Transboundary Water Supplies Target of Institute's Research. In *Divining*

- Rod. New México Water Resources Research Institute. Vol. XXXI, No. 3 July 2008. Pag 5.
- Rascón, Ezequiel, 2008. Personal Communication-Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez.
- Ramos, Luis Enrique, 2008. El Nuevo Rol de los Estados en la Gestión del Agua. En Primer Foro del Agua-Chihuahua: "Hacia una política de conservación y aprovechamiento". Panel III. Reglamentación. 10 y 11 de Abril 2008. Centro de Convenciones y Exposiciones de Chihuahua.
- Reyes, Armando, 2008. Personal Communication-International Boundary and Water Commission-Mexican Section
- Soto-Vega, Leonel, 2008. Personal Communication-Regional Office of the National Water Commission of Mexico-Comisión Nacional del Agua (CNA)
- Tillery, Sue, Zhuping Sheng, J. Phillip King, Bobby Creel, Christopher Brown, Ari Michelsen Raghavan Srinivasan, Alfredo Granados-Olivas, 2006. The Development of a Coordinated Database for Water Resources and Flow Modeling in The Paso del Norte Watershed. Technical Report Completion. NM WRRRI Report No. 337.TWRI TR 297. New Mexico Water Resources Research Institute and Texas Water Resources Institute. December, 2006. 98 pages.
- Van Schoik, Rick, D., 2003. Opportunities, Costs, Benefits, and Unintended Consequences: Secure and Sustainable Water by 2020. In The U.S.-Mexican Border Environment: Binational Water Management Planning. Edited by Suzanne Michel. SCERP Monograph Series No. 8. Southwest Center for Environmental Research and Policy. Publish by San Diego State University Press. 444 pages. ISBN 0-925613-40-1

■ ARTÍCULO DE REVISIÓN

Restauración del Río Grande/Río Bravo en El Paso-Ciudad Juárez

Charles D. Turner¹ · Traducción: Jorge A. Salas Plata Mendoza²

RESUMEN

El Río Grande/Río Bravo se transformó en un canal fuertemente estructurado para satisfacer las necesidades de abastecimiento de agua y para controlar las inundaciones. La región que rodea las ciudades gemelas de El Paso, Texas y Ciudad Juárez, Chihuahua, se conoce como Paso del Norte. El propósito de esta investigación fue la revisión de escenarios que le permitan al Río Grande/Río Bravo conducir un mínimo de agua en esta región. Los resultados de dicha investigación se presentan como reporte preliminar. Con el objeto de darle fluidez al escrito, el Río Grande/Río Bravo se menciona simplemente como el Río Grande.

Palabras clave: Palabras clave: Río Grande, Presa del Elefante, restauración, riego

INTRODUCCIÓN

El Río Grande nace en las montañas del sur de Colorado y fluye al sur por Nuevo México antes de voltear hacia el sureste rumbo a las ciudades gemelas de El Paso, Texas y Ciudad Juárez, Chihuahua. El río, en este punto, se convierte en la frontera internacional entre Estados Unidos y México, hasta su desembocadura en el Golfo de México. El principal tramo del río se define por tres regiones claras; cada región tiene su propio flujo y características

de calidad de agua. Las lluvias de invierno y el derretimiento de la nieve definen el flujo principal de la corriente del Río Grande desde su cabecera hasta el estrecho valle de irrigación en la parte central de Nuevo México. El flujo que sale de la región central de Nuevo México se almacena en la Presa del Elefante. El agua se extrae de esta presa durante la temporada de riego y constituye el flujo principal del río hasta Fort Quitman, Texas. Cuando el río fluye corriente abajo, el agua se deriva para propósitos de riego en el sur de Nuevo México, el oeste

¹ cturner@utep.edu

² jsalas@uacj.mx

de Texas, y el Valle de Juárez en México. Justo río arriba del centro de El Paso, la Presa Americana de derivación extrae una cantidad importante del flujo para el riego de la parte occidental de Texas. La Presa Internacional de derivación localizada aguas debajo de la Presa Americana deriva agua para el riego en el Valle de Juárez. Aguas abajo de las ciudades gemelas de El Paso y Juárez, la corriente de agua se compone principalmente de excedentes del riego y descargas de agua residual. El tramo del río aguas abajo de Fort Quitman, Texas hasta el Golfo de México, recibe un flujo tributario del Río Conchos y el Río Pecos. El área de estudio es el tramo del Río Grande desde la Presa del Elefante hasta Fort Quitman, Texas. Los retos en la región de El Paso/Ciudad Juárez son institucionales, de abastecimiento y calidad de agua. Años de cambio y manejo estructural del agua transformaron el Río Grande. La restauración de tramos de ríos dentro de áreas urbanas y suburbanas aumenta el desarrollo económico, la recreación y el entretenimiento, y mejora el bienestar social de la comunidad.

ANTECEDENTES

Las agencias institucionales en los niveles federal, estatal y local por mucho tiempo establecidas, existen para proporcionar irrigación y abastecimiento de agua municipal, controlar las inundaciones y administrar la calidad del agua. El desarrollo y la modificación de los servicios de dichas agencias para la restauración de ríos están en su fase inicial.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se dividió en dos secciones, la sección de acopio de datos y la sección de estudio del proyecto. La sección de acopio de datos se extiende desde la Presa del Elefante hasta Fort Quitman, Texas. Esta sección indica la región donde se obtuvieron los datos analíticos. El propósito fue enfocarse en la porción del río alimentado con aguas de la Presa del Elefante en lugar de considerar a la cuenca en su totalidad. Se presenta un mapa que muestra la sección de acopio de datos (Figura 1).

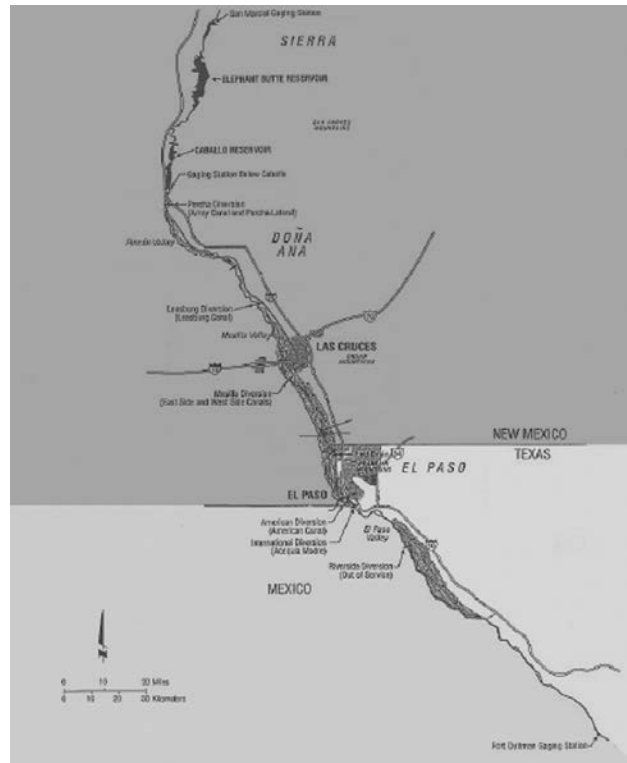


Figura 1. Río Grande

Se obtuvieron datos fuera de la sección de acopio para tener una vista completa de la función de río. La sección del sujeto de estudio del proyecto se subdividió en tres escenarios del río. El primer escenario es el tramo del río por la línea divisoria de Texas-Nuevo México, río arriba de El Paso. El Río Grande se entrecruza dentro y fuera de estos estados conforme fluye río abajo. El segmento del río se extiende aproximadamente 17 millas. La cantidad de agua del río depende de las necesidades del riego. El segundo escenario del río está en el estrechamiento del río entre el Monte Cristo Rey y las colinas de las Montañas Franklin al oeste de El Paso. El estrechamiento es un espacio entre las Montañas Franklin y las Montañas de Juárez. Las tierras inundadas se confinan dentro de los taludes inclinados, apacibles y naturales del cañón. La sección de estudio del proyecto de estudio es el segmento del Río Grande desde el Puente Courchesne a la Presa Internacional. La calidad del agua de esta sección es la misma que la primera (Ver Figura 2).

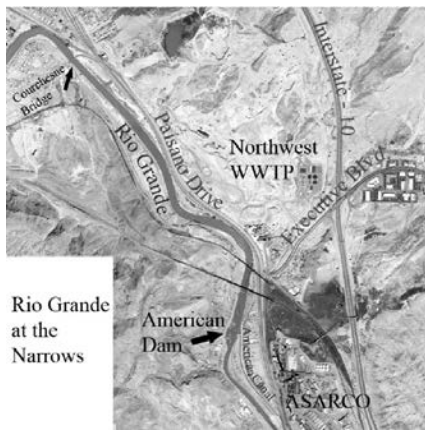


Figura 2. El Río Grande en el estrechamiento

Finalmente, el tercer tramo del río corre aguas debajo de la Presa Internacional a lo largo de las ciudades de El Paso y Juárez. Esta sección es el segmento que va hasta la Presa Riverside e incluye un canal de 4.4 millas de concreto revestido.

DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

La Agencia Federal del Grupo de Trabajo para la Restauración de Canales Abiertos (FISTCRWG, por sus siglas en inglés), define restauración como aquella actividad que incluye un amplio rango de medidas delineadas para permitirle a los canales abiertos recuperar su equilibrio dinámico y función en el nivel de auto sustentabilidad. Existen tres enfoques básicos en la restauración: no intervención y recuperación sin alteraciones; intervención parcial para una recuperación asistida (diseño ingenieril); e intervención importante para el manejo de la recuperación (políticas y manejo del río). El enfoque seleccionado dependerá del logro de los objetivos específicos dentro del contexto de las condiciones actuales o alteraciones en el curso del río.

No intervención y restauración sin alteraciones

Las alteraciones de un río se deben, directa o indirectamente, a las actividades o estructuras artificiales. Los tres factores de alteración en la Cuenca del Río Grande son los vasos de almacenamiento, las presas de derivación, y los diques. El flujo en el río proviene del almacenamiento de agua en vasos.

Las presas de derivación se utilizan para el riego. El río, en el área de estudio, se confina dentro de bordos o diques.

El flujo de la corriente proviene principalmente de las extracciones de la Presa del Elefante. El Pacto del Río Grande es un acuerdo entre los estados de Colorado, Nuevo México y Texas y asigna las aguas del río. Cada estado se obliga a entregar volúmenes al estado río abajo, con base en una tabla de relaciones de índice de suministro. Bajo este pacto, Texas es considerado el área río abajo de la Presa del Elefante. La Presa del Elefante es una estructura de concreto de gravedad situada a 125 millas al norte de El Paso. El vaso tiene una capacidad de almacenaje de 2.1 de millones de acres-pies. La presa fue construida entre 1912 y 1916 para suministrar agua para el Proyecto del Río Grande, y para suministrar agua a México bajo el Tratado de Agua de 1906. Además, la Presa del Elefante tiene una planta de generación de electricidad que proporciona energía a comunidades e industrias del área. Las extracciones de la Presa del Elefante tanto para generación de electricidad como para irrigación, se almacenan en la Presa del Caballo.

A principios del siglo XX, el Río Grande llegó a ser un asunto diplomático entre Estados Unidos y México. Las derivaciones del riego y construcción de presas río arriba, en Colorado, redujeron el flujo de la corriente que había sido utilizado históricamente por los usuarios mexicanos. La Presa del Elefante se construyó para almacenar agua utilizada para el riego en Nuevo México, Texas, y México. Esta presa es el principal almacenamiento del Proyecto del Río Grande y suministra agua a México bajo la Convención del 21 de mayo de 1906, conocida como el Tratado de 1906. El Proyecto del Río Grande proporciona agua para el riego de 178,000 acres en el sur de Nuevo México y el occidente de Texas. El proyecto también incluye presas de derivación, canales laterales, drenes, y una central hidroeléctrica en la Presa del Elefante. El agua de la Presa del Elefante se almacena en la Presa del Caballo hasta su extracción durante la temporada

de riego, que va normalmente de fines de febrero a principios de octubre. Durante la temporada de no-riego, no hay extracciones de esta presa. El río lleva flujos mínimos compuestos predominantemente por excesos del riego y descargas de agua residual. Bajo el Tratado de 1906, Estados Unidos debe entregar a México 60,000 acres-pies de agua por año. Si no hay suficiente agua, la entrega debe igualar una cantidad proporcional a la que se entrega a los Estados Unidos.

En contraparte, México acordó abandonar todo reclamo de aguas de riego en la frontera internacional de El Paso-Juárez. México desvía su porción de agua del Río Grande en la Acequia Madre. Este canal transporta agua por el Centro de Juárez hasta donde se mezcla finalmente con las aguas residuales. Los flujos combinados se utilizan en el Valle de Juárez para la agricultura, irrigando aproximadamente 18,000 acres en dicho valle. Las aguas que escurren en el río en este tramo, son excedentes del riego, aguas residuales y una mezcla de aguas del río y residuales.

La Presa de Caballo es una estructura de tierra situada a 25 millas río abajo de la Presa del Elefante y tiene una capacidad para controlar las inundaciones de 100,000 acres-pies y una capacidad de conservación de 231,510 acres-pies. Como se mencionó con anterioridad, el agua que se extrae de la Presa del Elefante se almacena en la Presa de Caballo durante la temporada de irrigación y durante operaciones de la central eléctrica de la Presa del Elefante. La Presa de Caballo fue construida bajo el Proyecto de Recuperación del Río Grande en 1933 y para ayudar a regular el flujo de las extracciones de la Presa del Elefante para generación de electricidad, control de inundaciones, y suministro de capacidad de almacenaje adicional. Las extracciones de la Presa de Caballo se regulan para satisfacer las demandas de riego y se programan para suministrar el riego a lo largo del río en la región Paso del Norte. El área justo al sur del vaso de almacenamiento, ahora parte de la Presa de Caballo, era vulnerable a excedentes de agua superficial

que entraban al río por un sinnúmero de arroyos que causaban inundaciones locales. Además, las extracciones de la Presa del Elefante erosionaban la zona de inundación y causaban sedimentación río abajo. La Presa de Caballo se diseñó para reducir estos dos problemas.

La opción del desmantelamiento de la presa debe tomar en consideración la interconexión entre las dos presas. Las presas almacenan agua para extracciones del riego en intervalos planificados. El agua se extrae de la Presa de Caballo según las necesidades de los poseedores de derechos de agua. En el sur de Nuevo México, las extracciones de la Presa de Caballo para la frontera de los estados de Texas-Nuevo México contabilizan aproximadamente un 72 por ciento del agua de la Presa de Caballo. La red de riego tiene una capacidad de aproximadamente 600,000 acres-pies. Cuando las extracciones de la Presa de Caballo exceden los 100 mil acres-pies, la red de riego no puede derivar ninguna agua adicional, es decir, las presas de derivación y el sistema de canales están a su capacidad máxima. Cualquier extracción adicional se va por el río. Sin embargo, esto sólo ha ocurrido cuatro veces en el período de 1940 a 2000. Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), *Censo de Agricultura del 2002*, el condado de Dona Ana en el sur de Nuevo México tiene un valor de mercado de productos agrícolas vendidos de 250 millones de dólares. El valor de mercado para el Condado de El Paso fue de 70 millones de dólares en 2002. Los valores de mercado incluyen las tierras no irrigadas de los cultivos agrícolas.

La información muestra que la agricultura es un factor económico significativo en la región. La política del manejo del Río Grande se configuró tomado en cuenta las necesidades de los poseedores de derechos de agua. En la región Paso del Norte, un gran número de poseedores de derechos de agua son agricultores de distritos de riego. Un proyecto de restauración que se centre en desmantelar las presas debe enfocarse primero en los derechos de

agua pública. Las tres presas de derivación discutidas son las presas de Mesilla, Americana e Internacional como se muestra en la Figura 3.

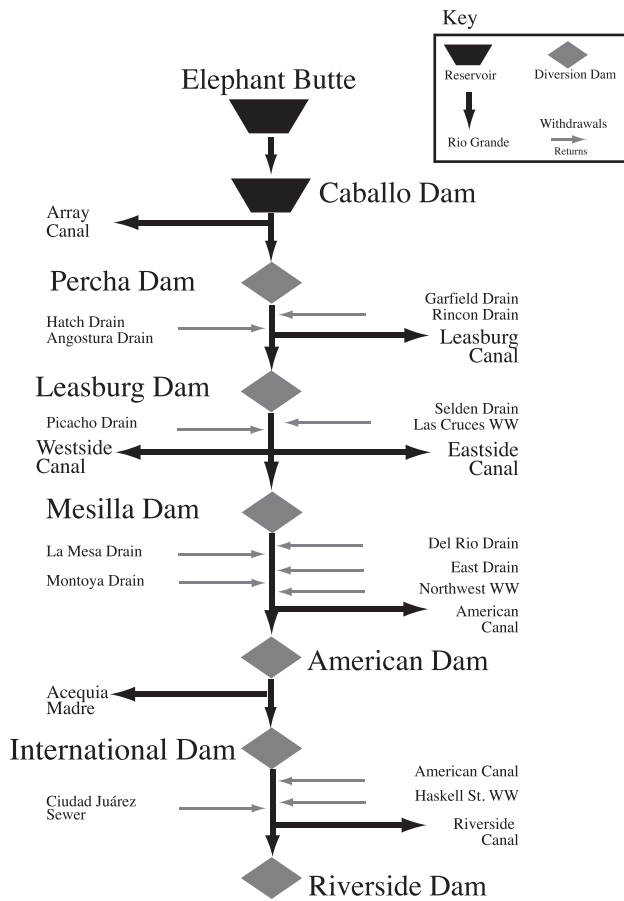


Figura 3. Presas de la zona de estudio

La Presa de derivación Riverside ya no está en operación. La Presa de derivación de Mesilla, se ubica a 40 millas al norte de El Paso y deriva agua al valle bajo de Mesilla y constituye un 45 por ciento del flujo del río a través de los canales este y oeste. La Presa Americana de derivación se ubica inmediatamente antes de la frontera internacional y se construyó para regular las entregas a México a los agricultores del Distrito #1 del condado de El Paso.

Quitar los diques permitiría al río retomar algo de su geomorfología e hidrología naturales. La llanura natural de inundación se restituiría, aumentando la anchura de la planicie del río. Así mismo, se restauraría el meandro de la corriente y la dinámica natural del río. Teóricamente esto crearía una

corriente constante. El flujo ayudaría a mejorar la diversidad del hábitat. Históricamente, en el caso del Río Grande, una corriente con meandros no sería necesariamente la mejor, ya que, antes del gran desarrollo de la irrigación en la región, ésta estuvo propensa a violentas inundaciones y períodos prolongados de sequía. La selección del río como frontera entre Estados Unidos y México demostró ser algo problemático. No fue raro que el río erosionara el bordo en un lado y depositara sedimento en el otro. Este proceso tuvo como resultado la formación de bordos donde una nación extendería su propiedad de tierra a costa del otro. El río estuvo también en condiciones de desbordar por su flanco y por los tramos cortos para formar herraduras. La más importante de estas alteraciones fue El Chamizal. El conflicto de El Chamizal fue resuelto en 1963, cuando se reencauzó el río a su ubicación original donde se construyó un canal revestido.

Intervención parcial para una separación asistida

La segunda categoría de opciones que se discute es la de agregar estructuras de ingeniería al río. Esta categoría es lo opuesto a dismantelar estructuras. Durante el verano de 2006, la región Paso del Norte experimentó una cantidad significativa de precipitación. El Servicio Meteorológico Nacional reportó que la lluvia de un año cayó en dos días en algunas áreas de la ciudad de El Paso. La última vez que ocurrió un acontecimiento de esta magnitud fue el 9 de julio de 1881 (Conferencia Federal de Evaluación de Inundaciones, Estación Experimental Agrícola de Texas). La avenida puso en aprietos las estructuras existentes para el control de las inundaciones en la región. Hubo un llamado de atención para mejorar las estructuras actuales de control de las inundaciones. La retención de los escurrimientos de las tormentas antes de que viertan al río reduciría la carga en el mismo. Establecer un método de captar agua durante eventos extremos y soltar gradualmente el agua almacenada a una tasa predeterminada fue otra opción revisada. Aunque

la región Paso del Norte es susceptible a tormentas durante la estación de los monzones del verano, la región promedia sólo ocho pulgadas por año en el Aeropuerto internacional de El Paso. Aproximadamente 90 por ciento de la precipitación evapora antes que pueda desembocar en los ríos o infiltrarse hacia el nivel freático.

El parámetro de calidad del agua de mayor preocupación del Río Grande es el de la salinidad. Una revisión de los registros de La Comisión Internacional de Límites y Aguas (IBWC, por sus siglas en inglés) de Miyamoto, Fenn, y Swietlik (1995), indica que la salinidad promedio del Río Grande en El Paso es de 1.0 dS m^{-1} la sodicidad (SAR) de 3.1 y una proporción Cl/SO_4 de 0.61 durante la estación principal de riego (del 15 de marzo al 15 de septiembre). Aguas abajo de Fort Quitman, la conductividad eléctrica se incrementa por un factor de 3.0, el SAR fue de 8.5 a 9.5, y el Cl/SO_4 de 1.43. Los incrementos se debieron a los excedentes del riego y las descargas de agua residual que contienen altos niveles de cloro y de sal por la disminución de los flujos.

Suministro de agua del subsuelo mediante bombeo

El suministro de agua al río por bombeo es otra opción que se revisó. Desde el punto de vista legal, sin embargo, suministrar agua subterránea a través de jurisdicciones gubernamentales es algo problemático. En el pasado, El Paso fue demandado por la exportación de agua de una cuenca, con base en la Ley de Embargo de Agua de Nuevo México que prohíbe este tipo de exportaciones y porque se consideró el agua propiedad del estado. No se sabe que asuntos legales se puedan presentar con el bombeo de agua al río proveniente de los acuíferos locales. Esta opción puede ser útil en el caso de tramos cortos o si se requiere irrigar vegetación nativa a lo largo del cauce, pero esta plantea varios problemas.

Políticas de manejo del río

El río presenció cambios, en su mayor parte hu-

mano-inducidos, que alteraron las características del flujo, hidrología, geomorfología, y calidad del agua. Una idea equivocada cuando se trata con un proyecto de restauración, es la idea de cambiar el río a su estado original dado que dicho estado es un tema subjetivo. En lugar de centrarse en el período de pre-irrigación, este reporte se centra en ese período de registro donde se cuenta con datos duros. Se llevó a cabo una revisión de la gestión y las políticas generales que regulan el Río Grande. La información que se muestra aquí está abreviada y presentada en términos generales.

Con el objeto de determinar el impacto que han tenido los cambios históricos en el régimen de flujo y cómo mitigar esos impactos utilizando diferente técnicas de flujo, el enfoque se centró en el hidrograma histórico. Los datos históricos de las estaciones de medición que se ubican en el Río Grande se compilaron de bases de datos en línea. La estación del Río Grande en El Paso se ubica en el Puente Courchesne que cruza de El Paso, Texas hacia Sunland Park, Nuevo México. Los datos históricos se revisaron para el período antes de la construcción de la Presa del Elefante (hidrograma antes de 1915); el período entre la terminación de la Presa del Elefante y de Caballo (hidrograma 1915-1940); y por último, el período después de que los proyectos mayores de recuperación se terminaron (hidrograma posterior a 1940). Se presenta una breve discusión acerca del patrón teórico de escurrimiento de primavera y del patrón del “río húmedo” del año. Los hidrogramas de flujo medio-diario antes de 1915 no fueran coherentes año tras año. Los flujos máximos son radicalmente diferentes en tiempo de ocurrencia y escurrimiento. El hidrograma antes de 1915 refleja lo más cerca posible la condición natural de flujo del río con base en los datos disponibles. Este período representa condiciones sin vasos de almacenamiento al sur del Colorado con la línea fronteriza del estado de Nuevo México. La disponibilidad limitada de datos de otras localidades a lo largo del río hace imposible juzgar el impacto a lo largo de la región. El hidrograma histórico de 1915-1940

muestra el impacto que la construcción de la Presa del Elefante tuvo en el río. Aunque se llevó a cabo una gran obra civil en el área de estudio alrededor de este periodo, dicha obra no terminó sino hasta mucho después de 1940. No obstante que el río esté ahora bajo un régimen controlado de flujo, el hidrograma no sigue una pauta coherente pero sí muestra un patrón de escurrimiento de primavera. La construcción de la Presa del Elefante durante este período temprano sirvió de poco para controlar las inundaciones locales por la falta de diques. La construcción de la Presa del Elefante también aumentó los problemas de sedimentación y no resolvió los asuntos internacionales en la frontera relativos a las inundaciones. El hidrograma del periodo posterior a 1940 muestra el impacto debido a la construcción de la presa de Caballo, la red de diques y el revestimiento de los canales. El hidrograma muestra un régimen controlado de flujo que no sigue una pauta de escurrimiento de primavera. Un patrón de escurrimiento de primavera se define como un modelo de río con un hidrograma con el gasto más grande en el río durante los meses de primavera. De manera natural, el patrón debería reflejar el comportamiento de un río alimentado por deshielos como es el caso aguas arriba de la Presa del Elefante. Una porción significativa del flujo de corriente en el Río Grande es el resultado de precipitaciones de invierno que caen en las aparentemente frías y húmedas regiones montañosas del sur de Colorado y el norte de Nuevo México. Numerosas estructuras del control regulan y manejan el flujo del Río Grande. El flujo debajo de la Presa del Elefante depende del volumen total de agua almacenada en las presas. En el pasado, siempre que hubiera agua en los vasos de almacenamiento, los usuarios municipales y los agricultores tuvieron agua suficiente. El volumen de agua almacenada en la Presa del Elefante se regula por las reglas del Pacto del Río Grande que, como se mencionó con anterioridad, es un acuerdo para garantizar distribuciones equitativas de aguas entre los estados de Colorado, Nuevo México, y de Texas. Las extracciones de la Presa del Elefante se

basan en un conjunto estricto de tablas de índice de agua y con base en las demandas de riego. El Río Grande es un río alimentado por los flujos del derretimiento de las nieves pero con un manejo estricto, con estructuras de control de flujo y de las extracciones para el riego. De marzo a septiembre, el río muestra sólo demandas de irrigación por el Distrito de Riego de la Presa del Elefante (EBID, por sus siglas en inglés) y el Distrito de Riego No. 1 de El Paso (EPCWID#1, por sus siglas en inglés). El Paso es el único usuario municipal y trata de 50,000 a 60,000 acres-pies por año, mucho del cual se regresa al EPCWID#1 como agua residual tratada.

La Presa del Elefante es capaz de almacenar dos millones de acres-pies de agua utilizada principalmente para irrigación en el sur de Nuevo México, el oeste de Texas, y del norte de México. La región desde la Presa del Elefante a Fort Quitman está bajo la administración Proyecto de Río Grande que proporciona 57 por ciento al EBID y 43 por ciento para el EPCWID#1, después de que México recibe su cantidad anual de 60.000 acres-pies (CERM, 1998). El EPCWID #1 concertó acuerdos durante los últimos 60 años con el organismo operador de agua de El Paso (EPWU, por sus siglas en inglés) para la transferencia de derechos de agua superficial (Jahagirdar, 2004). La industria agrícola es un factor económico importante en la región. Por esta razón, se vio la necesidad de entregar agua eficientemente a los usuarios de aguas abajo de la Presa del Elefante.

Establecimiento de los requisitos mínimos de flujo
Para calcular cuánta agua necesita el río en el Puente de Couchesne, se debe tener en cuenta la infiltración y la evaporación. El IBWC realizó un estudio para el periodo 1981–1983. La recarga media de infiltración (recarga al acuífero) en 9.2 millas desde en el tramo de El Chamizal a la Presa Riverside fue de 31,900 acres-pies o 44 cfs (pies cúbicos por segundo). Por lo tanto, si se utiliza un flujo mínimo histórico como base, se deben entregar 14 cfs en esta presa. Tomado en cuenta la recarga de agua

subterránea de 44 cfs y 14 cfs en el sitio de la Presa Riverside, el flujo aproximado debajo de la Presa Internacional sería 44+14 ó 58 cfs. Los valores mostrados anteriormente se basan en un cálculo de 365 días al año pero los datos verdaderos son probablemente algo más precisas si se consideran los 9 meses por temporada de riego. 58 cfs, como una cifra mínima de flujo, parece un punto de partida razonable no sólo porque protege a los organismos acuáticos y promueve un hábitat ribereño verdadero, sino porque es un valor histórico que mantiene agua en el río y refleja las entregas históricas a los agricultores durante los años secos.

Consideraciones de calidad del agua-agua residual de Ciudad Juárez

Ciudad Juárez cuenta con una población estimada de casi 1.6 millones, y genera casi 5.0 m³ del agua residual, que podría ayudar muy bien a mantener un flujo mínimo en el Río Grande, si el efluente de la descarga estuviera dentro de los estándares de calidad impuestos por ambos gobiernos. El potencial de descarga de Ciudad Juárez en el Río Grande existe, pero hay muchos factores que evitan que esto ocurra. Las aguas residuales, con o sin tratamiento, son utilizadas para la irrigación junto con agua del río que se deriva de la Presa Internacional. Esta agua se considera un recurso valioso y no se le permite regresar al río. Ciudad Juárez tiene dos plantas municipales importantes de tratamiento de agua residual que manejan aproximadamente el 70 por ciento de toda el agua residual generada. Actualmente, estas plantas son instalaciones sólo de tratamiento primario avanzado. El efluente de estas instalaciones es aproximadamente 150/150 mg/L, (demanda biológica de oxígeno/sólidos suspendidos totales). La capacidad combinada de estas

dos plantas es de 3,500 litros por segundo, aunque sólo la Planta Sur opera a su máxima capacidad. El efluente de estas dos plantas municipales se combina con aproximadamente 1,500 litros por segundo de agua residual sin tratamiento que se recibe al sureste de la Planta del Sur, y que se utilizan para los cultivos en el Valle de Juárez, donde se mezcla con el agua del río y de pozos para mejorar su calidad. Una vez que se utiliza el agua dentro del distrito de riego, todos los flujos excedentes del riego van a dar al Río Grande, aproximadamente 150 kilómetros río abajo, cerca de Fort Quitman. El volumen combinado de ambas plantas es un flujo significativo, teniendo en cuenta el hecho que las tierras de cultivo disminuyen rápidamente, por el crecimiento de los desarrollos urbanos en el Valle de Juárez. Sin embargo, la calidad actual de descarga de estas plantas no es adecuada para la descarga del río. Para proporcionar agua al Río Grande, estas dos plantas tendrían que ser actualizados al nivel de tratamiento secundario. Esto implica varios problemas como son: el hecho de que las plantas sólo tratan el 70 por ciento de las aguas residuales. La mayor parte de las otras plantas en la ciudad son muy pequeñas, y su efluente, aunque importante, no es significativo con relación a la capacidad instalada general que tiene la ciudad. En la mayoría de los casos, donde el tratamiento secundario está disponible, el efluente se recicla ya sea para proyectos verdes o para la construcción en general. La ciudad tiene planes para utilizar estas plantas para su proyecto de reuso "línea morada". La posibilidad de suministro de agua de las plantas de tratamiento de Ciudad Juárez es un tema importante ya que las plantas con tratamiento primario avanzado tendrían que estar en el nivel de tratamiento secundario, que produciría descargas al 200/200.

REFERENCIAS

Boyle Engineering, El Paso Water Resource Management Plan: 1990-2040

C.W. Stockton and W.R. Boggess, "Climatic Variability and Hydrolic Processes: An Assessment for the Southwestern United States," in *Proceedings of the International Symposium on Hydrometeorology*, edited by A.I. Johnson and R.A. Clark (Bethesda, MD: American Water Resources Association, 1982), pp. 317-320

De Waal, L. C., Large, A. R. G., Wade, P. M. editors. 1998 *Rehabilitation of rivers: principles and implementation*. Wiley. Chichester ; New York

Earl, R.A. and Czerniak, R.J. "Sunbelt water war: The El Paso-New Mexico water conflict", *Social Science Journal*, 1996, Vol. 33 Issue 4, p359

Environmental Protection Agency (EPA): River and Corridor and Wetland Restoration <http://www.epa.gov/owow/wetlands/restore> Date Accessed: 10/09/04).

Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG), Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. GPO Item No. 0120-A; SuDocs No. A 57.6/2:EN3/PT.653. ISBN-0- management alterations require consent from both the Governments of the United States and Mexico.

■ ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Parámetros biofísicos y de uso de suelo derivados de imágenes MODIS y Landsat para la evaluación de la dinámica territorial en la cuenca del Río Conchos, Chihuahua

Erick Sánchez Flores^a, Alfredo Granados Olivas^b

RESUMEN

Los efectos ambientales, económicos y sociales derivados de la dinámica de transformación de los usos y coberturas del suelo, constituyen una de las principales motivaciones de las disciplinas encargadas del estudio de las relaciones sociedad-naturaleza. Conocer y entender la respuesta que estos cambios provocan sobre diferentes parámetros biofísicos es esencial para monitorear el funcionamiento de los sistemas ecológicos a escala regional. La evapotranspiración es uno de estos parámetros, cuyo monitoreo, aunque difícil de llevar a cabo, resulta indispensable para el cálculo de balances hídricos en regiones semiáridas. La tecnología de los sistemas de percepción remota ofrece la posibilidad de monitorear la evapotranspiración a escala regional, así como de evaluar los cambios en el uso y cobertura del suelo que podrían estar asociados con ésta. En este trabajo evaluamos la dinámica territorial en las áreas ribereñas de la cuenca del Río Conchos en Chihuahua, utilizando productos derivados de imágenes MODIS y Landsat. Los resultados muestran que un ligero incremento de la evapotranspiración podría estar asociado con el incremento de pastizales naturales y el bosque de pino. No fue posible observar efectos significativos entre los cambios asociados con los suelos agrícolas y las variaciones en la evapotranspiración de las zonas ribereñas. Es importante considerar los efectos de las diferencias de escala en los conjuntos de datos para poder obtener patrones más claros en las relaciones espacio- temporales entre estos fenómenos.

Palabras clave: Cambios de uso y cobertura del suelo, Evapotranspiración, MOD16

^a esanchez@uacj.mx

^b agranados@uacj.mx

INTRODUCCIÓN

La creciente atención que ha recibido el estudio de las complejas interacciones sociedad-naturaleza es producto de las manifestaciones cada vez más evidentes de una serie de desbalances en el funcionamiento de los sistemas ecológicos, que repercuten en la disminución de la productividad, el aumento de los riesgos ambientales y el deterioro de la calidad de vida de la sociedad. Una mejor comprensión de las causas y efectos de estas interacciones demanda, entre otras cosas, la evaluación precisa de diversos parámetros biofísicos involucrados en el proceso y los mecanismos que los impactan. Los cambios en el uso y cobertura del suelo representan uno de tales mecanismos y sus efectos pueden alterar las condiciones del flujo de materia-energía, afectando con ello procesos físicos vitales como la transferencia de agua entre diferentes subsistemas terrestres.

La Evapotranspiración (ET) es uno de los parámetros que juega un papel principal en los balances energía y agua superficial. La ET es el segundo componente más grande del ciclo hidrológico y representa más del 50% del total de volumen de agua que se reintegra a la atmósfera desde la superficie terrestre (Woodhouse 2008). Debido a su importancia en el balance de agua a escalas regional y global, las estimaciones de la ET son críticas en el monitoreo de diversos fenómenos ambientales, incluidos el ciclo del carbono, la dinámica del clima y la vegetación, la evaluación de riesgo por sequía e incendios, así como la administración de recursos hídricos (Batra *et al*, 2006; Allen *et al*, 2008).

A pesar de su papel fundamental en estas y otras muchas aplicaciones, la ET es muy difícil de medir debido a su amplia variabilidad espacial y a su invisibilidad inherente (Woodhouse, 2008). Comúnmente, la ET se mide usando métodos directos como la medición del gasto de agua o la transferencia de vapor. Estos métodos se basan en la medición de los factores principales que controlan la ET: disponibilidad de agua, energía radiante y mecanismos de transporte para remover el vapor

de la superficie de evapotranspiración. Estos factores de control de la ET dependen en gran medida de variables como la humedad y temperatura del suelo, la temperatura del aire, la cobertura de vegetación, la presión del vapor de agua y la velocidad del viento (Batra *et al*, 2006). Un enfoque común para cuantificar estos factores consiste en usar una combinación de sistemas de percepción remota y datos auxiliares de variables superficiales y atmosféricas para medir la ET (Norman *et al*, 2003).

Los sistemas de percepción remota están siendo usados cada vez con mayor frecuencia para apoyar tanto las estimaciones de ET, como para monitorear la dinámica terrestre asociada con los cambios en el uso y cobertura del suelo. En el contexto de la estimación de la ET, se intenta relacionar la temperatura radiométrica de la superficie (T_0), proveniente de imágenes termales, con el verdor de la vegetación derivado de índices de vegetación (Venturini *et al*, 2004). En superficies con el mismo tipo de vegetación, a mayor temperatura, disminuye la cantidad de agua disponible y por lo tanto la cantidad de ET a la atmósfera (Allen *et al*, 2008). De la misma forma, una mayor densidad en la cobertura de vegetación permite una mayor ET (Laczniaik *et al*, 2001). Al apoyarse en estos principios, el uso de sistemas de percepción remota es un método efectivo para transferir las medidas *in situ* de ET a escala regional (Scott 2007).

En el contexto del monitoreo de los cambios en el uso y cobertura del suelo, los sistemas de percepción remota registran las condiciones iniciales de cobertura del suelo a partir de los valores de reflectancia de la superficie, que se comparan con los valores de fechas posteriores para determinar la naturaleza e intensidad del cambio (Lambin and Strahler 1994). A escalas regionales estos cambios, derivados en su mayoría de la influencia de factores antropogénicos, están directa o indirectamente relacionados con las variaciones en parámetros biofísicos esenciales como la ET.

En las regiones semiáridas, la escasez de agua superficial provoca que la ET proveniente de las

áreas ribereñas se considere un componente clave de los balances hídricos regionales por la concentración intermitente o perenne de agua superficial. Sin embargo, los emplazamientos rurales y urbanos en muchas de estas áreas están impactando dichas condiciones a través de cambios en la cobertura y uso del suelo, desvío de causas superficiales y disminución de los niveles freáticos en los mantos acuíferos (Scott *et al*, 2008), lo que afecta directamente las tasas de ET. De esta forma, la estimación de la evapotranspiración ribereña (*r*ET) y los cambios de uso y cobertura del suelo asociados a ésta en regiones semiáridas, se convierte en un componente crucial del balance hídrico regional para apoyar los mecanismos de distribución de agua que soportan actividades productivas y procesos ecológicos esenciales.

Muchas regiones en el mundo, sin embargo, carecen de una red lo suficientemente densas de estaciones micro meteorológicas para la medición directa de ET. Este es el caso en la mayoría de las cuencas hidrológicas en la región semiárida del norte de México, donde la ausencia de estimaciones precisas de ET, dificulta la distribución de recursos hídricos para usos económicos y para el soporte de procesos ecológicos esenciales. Por otro lado, no existe tampoco un registro preciso de la forma como la dinámica de utilización y transformación de la cobertura del suelo, afecta sus mecanismos de transferencia.

En este ejercicio, usamos datos derivados de MODIS para estimar la cantidad de ET y datos derivados de imágenes Landsat para determinar los cambios en el uso y cobertura del suelo en áreas las áreas ribereñas de la cuenca del Río Conchos durante el periodo 2000–2006, utilizando un enfoque de modelación espacial en SIG.

DATOS Y MÉTODOS DE ESTUDIO

El trabajo se llevó a cabo en la cuenca del Río Conchos localizada en el norte de México. El Río Conchos es un tributario de la cuenca binacional del Río Bravo compartida por México y los Esta-

dos Unidos (Figura 1). Los acuíferos de esta cuenca se utilizan para satisfacer la creciente demanda de agua para uso industrial y agrícola vinculada con la incorporación de la economía mexicana al TLC (Kelly, 2001). De estos usos, la agricultura es la actividad económica de mayor consumo de agua en la Cuenca del Conchos, consumiendo más del 90% del volumen de agua extraída y con eficiencias en los sistemas de irrigación tan bajos como el 40% (CNA, 1997). Este escenario se ve agravado por la obligación de entrega de agua al Río Bravo de acuerdo con el tratado de 1944 y la reciente y prolongada sequía por la que atraviesa la región, lo que crea condiciones vulnerables que amenazan la provisión de agua para soportar procesos ambientales y económicos esenciales en la cuenca del Conchos.

Debido a las implicaciones geopolíticas del uso del agua en esta región binacional, el área de estudio incluyó también la región hidrológica 24 (RH24), la cual se extiende hacia el noroeste desde la desembocadura del Conchos en el Río Bravo, a lo largo de la frontera hasta Ciudad Juárez. La región RH24 posee condiciones particulares en el uso del agua para uso agrícola y urbano por su ubicación en la frontera. Delimitada con estos criterios, el área de estudio cubre aproximadamente 80,688 km² con un rango de elevación que va de los 647 m. en los matorrales desérticos del noreste hasta los 3,300 m. en los bosques templados del suroeste de la cuenca.



Figura 1. Ubicación de la cuenca del Río Conchos en los estados de Chihuahua y Durango, en el norte de México.

Los datos de ET usados en este estudio provienen del producto MOD16 para monitoreo de la Evapotranspiración. MOD16 se calcula diariamente a nivel global a una resolución de 1 km² y representa los valores de transpiración de la vegetación y de evaporación de la cubierta vegetal y del suelo expresados en mm/día. Su cálculo se basa en la ecuación de Penman-Monteith y utiliza datos de cobertura del suelo de MOD15 y datos meteorológicos a nivel global. El producto MOD15 (FPAR/LAI) representa la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) que es absorbida por las plantas en el rango espectral de los 0.4 - 0.7 μm, dividido por Índice de masa de la hoja (LAI) (Yang *et al.* 2006). Para el propósito de este estudio los datos de MOD16 se agregaron en composiciones anuales (Figura 2).

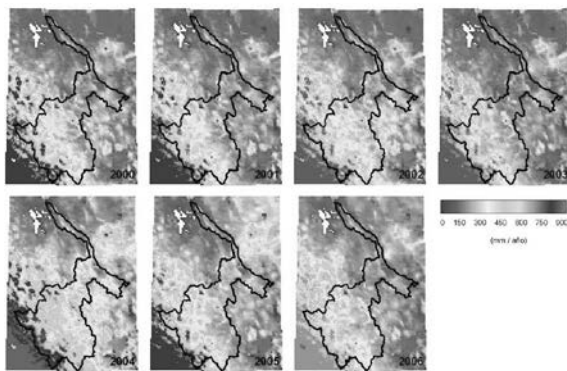


Figura 2. Composiciones anuales de los valores de ET de MOD16 de la cuenca del Río Conchos.

Las composiciones anuales de ET muestran mayores variaciones la porción montañosa del suroeste de la cuenca. El año con el registro más húmedo durante el periodo de estudio fue el 2004, con un promedio de 144.81 mm/año de ET. Por el contrario, el año más seco fue 2003 con un promedio de 111.91 mm/año y la variabilidad más baja con un rango de 333.8 mm/año en comparación con los 420.1 m/año registrados en el 2001. Las condiciones más extremas se registraron al norte de la región RH24 con 0 mm/año y al sur de la Sierra Madre Occidental con más de 800 m/año.

Para la extracción de los valores de ET en las zonas ribereñas de la cuenca se utilizó una base de datos digital de la red hidrológica de la cuenta, sobre la que se construyeron zonas de amortiguamiento o zonas ribereñas. Al mismo tiempo, se vectorizaron los límites de las celdas del productos MOD16 y se transfirieron sus valores al centroide de cada celda (Figura 3). Este valor se asignó en proporción al área ribereña en proporción a la superficie de la misma dentro de la celda, de acuerdo con el siguiente algoritmo:

$$rET = \sum_{i,j=1} [ET_{i,j} * rA_{i,j}] / A_{i,j}$$

donde *rET* representa la evapotranspiración ribereña; *ET_{i,j}* el valor de evapotranspiración del pixel *i,j*; *rA_{i,j}* el área ribereña en la celda *i,j*; y *A_{i,j}* el área de la celda *i,j*.

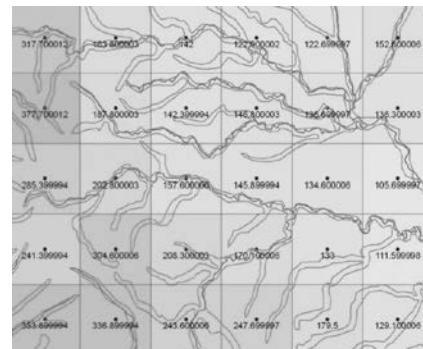


Figura 3. Delimitación de las áreas ribereñas y asignación de sus valores de ET correspondientes.

Los valores de *rET* obtenidos mediante este proceso se compararon con los cambios de uso y cobertura del suelo, derivados de los datos de las cartas de uso de suelo y vegetación escala 1:250,000 de las series II y III producidas por el INEGI en 1993 y 2003 respectivamente a partir de imágenes Landsat TM y ETM⁺. Los cambios en el uso del suelo fueron obtenidos mediante la aplicación del modelador Land Change Modeler diseñado para el procesamiento de datos *raster*. Asimismo se extrajeron las coberturas de suelo para las áreas ribereñas a fin de establecer una relación con las variaciones de *rET* en la cuenca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las áreas ribereñas extraídas cubren aproximadamente 16,193 km², lo que representa el 18.2% del total del área de estudio. Los valores medios de la ET calculada para toda la cuenca y sólo para las áreas ribereñas se representan en la Figura 4, donde es posible observar un periodo de análisis relativamente estable. Las variaciones más notables se pueden observar en los valores medios de la ET para toda la cuenca, entre 2003 y 2004, mismos que se confirman aquí como el año más seco y el más húmedo respectivamente.

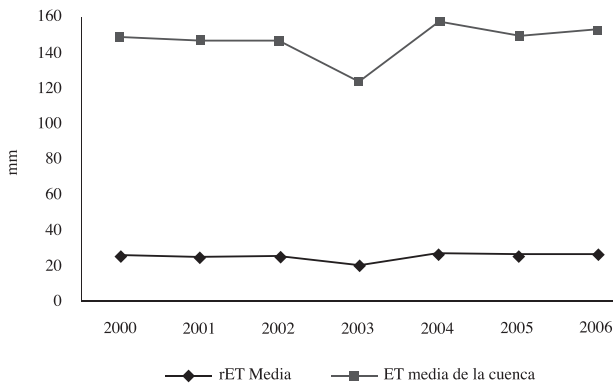


Figura 4. Evapotranspiración ribereña media anual y evapotranspiración media anual de la cuenca.

De acuerdo con las estadísticas de *rET* presentadas en la Tabla 1, el promedio anual de *rET* durante el periodo de análisis fue de 24.59 mm, con una mínima de 20.75 mm en 2003 y una máxima de 26.49 mm en 2004. Estos valores se pueden considerar la contribución anual de las áreas ribereñas al componente hidrológico de la ET en la totalidad de la cuenca. El promedio anual de *rET* representa el 21.17% del promedio del ET total de la cuenca. La mayor variabilidad de los valores de ET en toda la cuenca pueden deberse en parte a la mayor y más constante disponibilidad de agua en los corredores ribereños, lo que podría reducir las grandes variaciones que ocurren de un año a otro en las partes más secas de la cuenca.

Tabla 1. Estadísticas de *rET* durante el periodo de análisis

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Min	4.0 ⁻⁵	4.3 ⁻⁵	4.1 ⁻⁵	3.8 ⁻⁵	4.1 ⁻⁵	5.0 ⁻⁵	4.6 ⁻⁵
Max	3106	3106	3106	3106	3106	3106	3106
Media	24.79	24.62	24.62	20.72	26.49	25.11	25.78
Std	76.50	76.44	76.42	75.91	76.67	76.35	76.52
Sum*	73.55	73.07	73.07	61.51	78.64	74.52	76.52

* miles

El uso y cobertura del suelo extraído de las dos series de datos de INGEI se muestran en la Figura 5. Aquí es posible observar que aproximadamente el 40% de la cuenca en la parte más baja está ocupado por matorral desértico micrófilo, mientras que la mayor parte de la parte centro y suroccidente de la cuenca, se encuentra ocupada por pastizal natural y la parte alta de la sierra por bosques de pino y pino-encino. Las zonas de agricultura ocupan principalmente las planicies intermontañas del centro de la cuenca, mientras que las zonas urbanas que más destacan son la ciudad de Chihuahua y Ciudad Juárez.

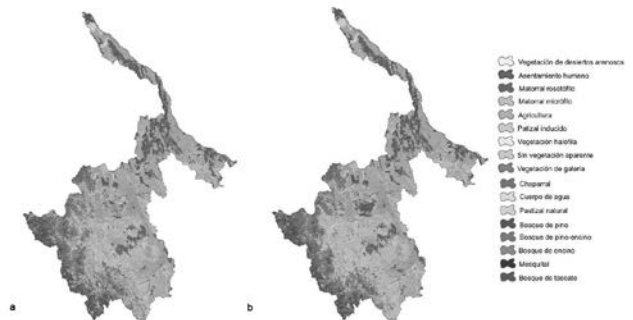


Figura 5. Cobertura y su del suelo de la series II (a) y III (b) de la carta de Uso de Suelo y Vegetación de la cuenca del Río Conchos.

La dinámica territorial de la cuenca, asociada con de uso y cobertura del suelo, muestra un paisaje relativamente estable en el periodo de observación con porcentajes de cambio por abajo del 5% del áreas de cada tipo. Los cambios más importantes detectados para las áreas ribereñas incluyen por ejemplo, un aumento del 5% de las áreas de pastizal natural y una disminución de las áreas de pastizal inducido de casi la misma proporción. Esta dinámica podría estar asociada con la invasión de arbustos de tallo leñoso en las áreas de pastizal in-

ducido que son abandonadas. Otros cambios importantes están representados por una disminución de 0.2% en las áreas dedicadas a la agricultura. Todos estos cambios parecen estar asociados con un incremento del 2% en los valores de evapotranspiración en las zonas ribereñas.

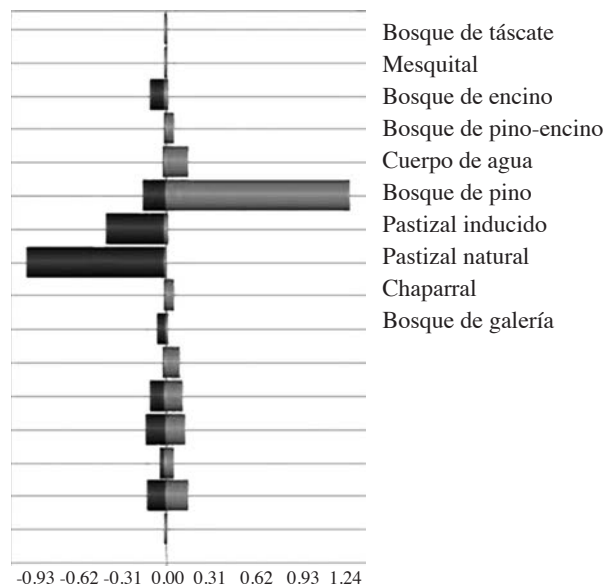


Figura 6. Porcentaje de cambio neto de uso y cobertura del suelo de la series II y III de la carta de Uso de Suelo y Vegetación en las áreas ribereñas de la cuenca del Río Conchos.

Las ganancias y pérdidas netas de cada uso y cobertura del suelo en las áreas ribereñas revelan un aparente cambio, principalmente de ambos tipo de pastizal a bosque pino (Figura 6). Asimismo, es posible observar una pérdida de bosques de encino y bosque de galería. Entre las coberturas que muestran un equilibrio entre las pérdidas y ganancias de superficie están la de vegetación halófila, agricultura, y matorral micrófilo. Aunque algunos de estos cambios, como el aumento en los pastizales naturales, podría tener alguna relación con el ligero aumento de la rET, en otros casos la relación no fue tan clara. Por ejemplo, no fue posible observar efectos significativos entre los cambios asociados con los suelos agrícolas y las variaciones en la evapotranspiración de las zonas ribereñas. Éste puede deberse en parte a la gran diferencia de escalas de los datos fuente analizados. Por otro lado, las pe-

queñas variaciones en los criterios de clasificación entre ambas series uso de suelo y vegetación podrían estar afectando considerablemente el resultado obtenido.

CONCLUSIONES

En este trabajo se mostró un ejercicio para la obtención de evapotranspiración ribereña en la cuenca del Río Conchos, Chihuahua, a partir de productos derivados de imágenes MODIS, utilizando como enfoque de análisis espacial. Las variaciones detectadas en este parámetro se asociaron entonces con los cambios en el uso y cobertura del suelo derivados imágenes Landsat. La dinámica de uso y cobertura observada fue relativamente estable durante el periodo de observación. Los cambios más importantes tienen que ver con las áreas de pastizal natural e inducido, así como con el bosque de pino. No fue posible observar efectos significativos entre los cambios asociados con los suelos agrícolas y las variaciones en la evapotranspiración de las zonas ribereñas. Sin embargo, es difícil asegurar si esta dinámica en el uso del suelo tiene una relación directa con el ligero incremento en la evapotranspiración que se registró en las zonas ribereñas. Es necesario contar con mayor resolución espacial en los datos de evapotranspiración y mayor resolución temporal en los datos de uso y cobertura del suelo para poder establecer relaciones más claras entre el efecto de estos cambios y las variaciones en las aportaciones de ET desde las zonas ribereñas a la atmósfera.

REFERENCIAS

- Allen, R. G., D. Toll, W. Kustas, and J. Kleissl, "From high overhead: ET measurement via remote sensing". *Southwest Hydrology*, vol. 7 (1), p.p. 30-34, 2008.
- Baker, J. M., "Challenges and cautions in measuring evapotranspiration", *Southwest Hydrology*, vol. 7 (1), p.p. 24-25, 2008.
- Batra, N., S. Islam, V. Venturini, G. Bisht, and L. Jiang, "Estimation and comparison of evapo-

- transpiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 103, p.p. 1-15, 2006.
- CNA. “Programa Hidráulico de Gran Visión, Estado de Chihuahua (1996-2000)”. Chihuahua: CNA, 1997.
- Goodrich, D. C., R. Scott, J. Qi, B. Goff, C. L. Unkrich, M. S. Moran. “Seasonal estimates of riparian evapotranspiration using remote and in situ measurements”, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 105 (1), p.p.281-309, 2000.
- Gutiérrez, M., E. Johnson, E., and K. Mickus. “Watershed assessment along a segment of the Rio Conchos in Northern Mexico using satellite images”. *Journal of Arid Environments*, vol. 56 (3), p.p. 395-412, 2004.
- Kelly, M. E. *The Río Conchos: A preliminary overview*, Austin, TX: Texas Center for Policy Studies, 2001.
- Kim, T. W., J. B. Valdes, and C. Yoo. “Nonparametric approach for estimating return periods of droughts in arid regions”. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 8 (5), pp. 237-246, 2003.
- Laczniaik, R. J., J. L. Smith, and P. E. Elliott, “Ground-water discharge determined from estimates of evapotranspiration, Death Valley regional flow system”. *WRI Report 01-4195*, Nevada and California USGS, 2001.
- Lambin, E. F., and Strahler, A. H. (1994). “Indicators of land-cover change for change vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales”. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 2099-2119.
- Norman, J. M., M. C. Anderson, W. P. Kustas, A. N. French, J. Mecikalski, R. Torn, “Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions”. *Water Resources Research*, vol. 39(8), p.p. 1221, 2003.
- Scott, R. L., “Multiyear riparian evapotranspiration and groundwater use for the Upper San Pedro Basin”. *Southwest Hydrology/Arizona Hydrological Society Regional Water Symposium*. Tucson, AZ, 2007.
- Scott, R. L., D. C. Goodrich, D. G. Williams, T. E. Huxman, and K. R. Hutline, “Quantifying riparian evapotranspiration”. *Southwest Hydrology*, vol. 7 (1), p.p. 26-27, 2008.
- Venturini, V., G. Bisht, S. Islam, and L. Jiang, “Comparison of evaporative fractions estimated from AVHRR and MODIS sensors over South Florida”. *Remote Sensing of Environment*, vol. 93(1-2), p.p. 77-86, 2004.
- Watson, R. T., Noble, I. R., Ravindranath, N. H., Verardo, D. J., & Dokken, D. J. (2000). *Special report on land use, land-use change and forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Woodhouse, B., “Approaches to ET measurement”. *Southwest Hydrology*, vol. 7 (1), p.p. 20-21, 2008.
- Yang W.Z., D. Huang, B. Tan, J. C. Stroeve N. V. Shabanov, Y. Knyazikhin, R. R. Nemani, and R. B. Myneni. “Analysis of leaf area index and fraction of PAR absorbed by vegetation products from the terra MODIS sensor: 2000-2005”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44(7), p.p. 1829-1842, 2006.

■ ARTÍCULO DE REVISIÓN

Uso de tecnología para el entendimiento de la integral de línea en el contexto de electricidad y magnetismo

González-Quezada,¹ S. Flores-García,² Salazar-Álvarez,³ J.F. Estrada-Saldaña,⁴
E. Ordóñez-Casanova,⁵ F. Molina-Solano⁶

RESUMEN

El diseño de actividades de aprendizaje que tengan como objetivo desencadenar los procesos psíquicos superiores como son el análisis, la síntesis, la comparación, la deducción, la inducción, el razonamiento lógico, el razonamiento analógico y las heurísticas, entre otros procesos mentales es una de las tareas de los profesores. Estas actividades deben desenvolverse en los tres ambientes básicos: el numérico, el algebraico y el gráfico, puesto que el cambio de un ambiente a otro, *el juego de marcos* (Douady,1995), propicia el aprendizaje. El uso de tecnología facilita esta interacción de ambientes. El apoyarse en nuevas tecnologías, como lo es el uso de programas como el Cabrí, hace posible la experimentación y exploración sistemática que permiten al alumno buscar regularidades, analizar y procesar los resultados (Jiménez J., 2003). Presentamos tres tutoriales dirigidos a la comprensión de los conceptos básicos para acceder al tratamiento de la integral de línea como una suma de productos punto apoyados en el uso del programa Cabrí desarrollados en base a los resultados de dos exámenes de diagnóstico así como los resultados más relevantes obtenidos al implementar dichos tutoriales.

Palabras clave: Integral, tutoriales, aprendizaje, electricidad, magnetismo

¹ mdolores@nmsu.edu
² sergifo1@hotmail.com
³ msalazar@uacj.mx
⁴ festrada@uacj.mx
⁵ eordonez@uacj.mx
⁶ fmolina@itcj.mx

INTRODUCCIÓN

La Integral de Línea, que se estudia aisladamente en cursos introductorios de cálculo en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, posiblemente se puede comprender mejor en el contexto de algunos temas que se estudian en electricidad y magnetismo, como es el potencial eléctrico.

Los objetivos que permiten desarrollar la presente investigación son: (1) Implementación de una modificación en la instrucción para el desarrollo conceptual de integral de línea como herramienta para el entendimiento del concepto de diferencia de potencial. (2) Uso y manejo de la integral de línea como el límite de una suma de productos punto entre el vector campo eléctrico y el vector desplazamiento. (3) Detectar, caracterizar y analizar las dificultades de orden cognitivo de los estudiantes durante el aprendizaje de la integral de línea y el producto punto. (4) El alumno resolverá situaciones problemáticas enmarcadas en el contexto de la teoría electromagnética a través de sumas finitas de productos punto entre el campo eléctrico y el desplazamiento sobre una trayectoria de integración. (5) El alumno institucionalizará el concepto de integral de línea como una suma de productos punto.

Con el objetivo de diagnosticar el nivel de entendimiento de este problema se aplicaron dos exámenes. El primero de ellos se aplicó en marzo del 2004 a 36 estudiantes del curso de Física III del área de Ingeniería, en el que se formularon preguntas acerca del *trabajo* desarrollado por una fuerza, el concepto de *producto punto* en forma gráfica y analítica, el concepto de *trabajo* como una *integral de línea*. El segundo examen se diseñó en base a los resultados obtenidos en el primero y se aplicó en octubre del 2004 a 55 estudiantes del curso de electricidad y magnetismo pertenecientes a la carrera de mecatrónica, siendo los contenidos de estos cursos (Física III y Electricidad y Magnetismo) los mismos.

El objetivo del segundo examen de diagnóstico fue investigar los conocimientos del alumno acerca de proyecciones y trabajo para utilizarlos como

base para el desarrollo de los conceptos de producto punto e integral de línea.

TUTORIALES

Después de aplicar los exámenes de diagnóstico y analizarlos para detectar el tipo y el grado del problema al que nos enfrentamos, se procedió a la elaboración de tres tutoriales (cuadernos de trabajo), los dos primeros, titulados *Proyecciones* el primero y *Producto punto* el segundo, con el objetivo de proveer al estudiante de los conocimientos previos, que, como pudimos observar durante el análisis de los exámenes de diagnóstico, no poseen o son insuficientes. Y el tercero, *Integral de línea*, en el que se conjuntan los conceptos de los tutoriales previos y se intenta arribar al concepto de integral de línea, utilizando la suma de productos punto y ubicándolos en el contexto de potencial eléctrico.

Los tutoriales, llamados así por su estructura, consisten en guiar al estudiante, por medio de preguntas, a que elaboren conclusiones en base a conocimientos previos y a las observaciones que pueden hacer al utilizar los trabajos que en el programa Cabrí se realizaron con este fin. Al elaborar estos trabajos se trata de apoyar a la práctica tradicional de enseñanza, permitiendo al alumno interactuar con el programa, hacer conjeturas y comprobarlas o descartarlas en su caso. Con base en esto, podemos sugerir que el uso de Cabrí permite la visualización de los objetos, dando una representación geométrica a los conceptos matemáticos; permite también cambiar parámetros y observar los efectos que estos cambios ejercen sobre otros parámetros.

Una de las finalidades al utilizar Cabrí es observar el efecto que tiene el uso de nueva tecnología en el aprendizaje de estos conceptos en particular, ya que según Collete Laborde (Laborde, 2004), “el uso coordinado de diversas herramientas contribuye a la construcción de relaciones entre piezas independientes de conocimiento y puede construir una base para una estructuración coherente”. Esta herramienta también proporciona un acercamiento lúdico que atrae al estudiante hacia el contenido

(López G, 2005), así como observar si se obtiene una mejor motivación y respuesta al tener acceso a un tipo diferente de instrucción.

En este tipo de material, se cuestiona al estudiante sobre lo que está observando y se le pide que lo escriba, ya que el hecho de tener que escribir algo, exige que clarifique sus ideas, formando con esto estructuras importantes que lo apoyarán en la construcción del concepto. “Estas estructuras mentales son el resultado de la actividad física sobre el material concreto” (Artigue M., 2004).

TUTORIAL 1: PROYECCIONES

Las primeras instrucciones del tutorial 1 (Anexo 1) son para relacionar al estudiante con el programa, para lo cual es recomendable que se expliquen algunas funciones básicas. A continuación se presentan los elementos con los que va a trabajar: el vector en color violeta, una recta perpendicular al eje x en color azul y la proyección del vector \vec{A} sobre el eje x de color rojo, los cuales se encuentran en la Figura 1.

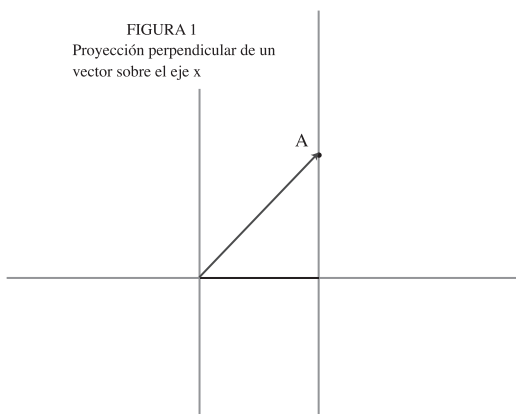


FIGURA 1
Proyección perpendicular de un vector sobre el eje x

Figura 1. Proyección perpendicular en el programa proyecciones en Cabrí.

En las preguntas 1 y 2 se trata de que el alumno localice un punto en la figura 1 y dos puntos en la figura 2 del programa proyecciones elaborado en Cabrí. Al moverlos, cambian tanto la dirección como la magnitud de los vectores, y con ello, cambia la proyección. Los objetivos de estas dos primeras actividades son, primero, que mueva libre-

mente los puntos, atendiendo a la parte lúdica que el programa provee, y segundo, que observe los cambios en la proyección. Es importante que note: ¿Qué pasa cuando cambia el ángulo?, ¿Qué sucede cuando cambia la magnitud de uno de los vectores? ¿Cómo es la proyección? Se muestra una línea perpendicular para que se de cuenta de la relación que ésta tiene con la proyección.

La pregunta 3 se basa en el hecho de que la proyección puede ser mayor que el vector sobre el cual se proyecta y que además es perpendicular al mismo. La cuarta pregunta, tiene como finalidad provocar que el alumno “evoque” un conocimiento que supuestamente ya posee, como lo menciona Rene Saucedo (Saucedo R., 2005) “El recuerdo es una asociación de imágenes para alguna palabra, un concepto, un nombre” ya que los temas a ser aprendidos, se relacionan con algún aspecto existente en la estructura cognitiva del aprendiz, para que, por último, lo exprese en forma matemática, es decir, en forma de una ecuación. Este último paso es ambicioso, ya que representa una de las mayores dificultades que los estudiantes de todo el mundo presentan de acuerdo a una investigación realizada por Kanim y Cohen (Kanim S., 2005) “Los estudiantes incurren en un error llamado *reversal error* cuando se les pide convertir una descripción escrita entre dos cantidades a una ecuación matemática”.

TUTORIAL 2: PRODUCTO PUNTO

En la parte I del programa en Cabrí se presentan los elementos disponibles: Los vectores \vec{A} y \vec{B} , los puntos 1 y 2, en color café y la línea amarilla que representa la proyección del vector \vec{A} sobre el vector \vec{B} , como se muestran en la Figura 2.

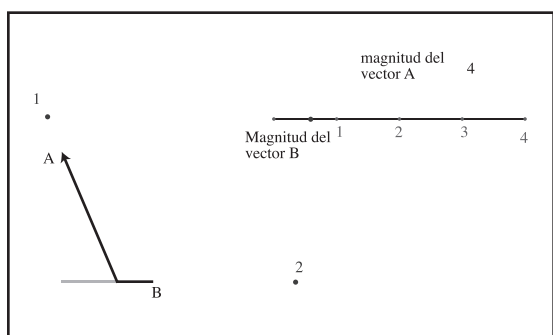


Figura 2. Elementos que componen el programa pry3 en Cabri.

En las instrucciones del 1 al 4 del tutorial 2 (Anexo 2) se solicita que mida la magnitud del vector \vec{A} , el ángulo entre los dos vectores y que realice cálculos con los resultados de estas mediciones, utilizando para ello, las herramientas que el programa nos proporciona, mostrando los íconos correspondientes que aparecen en la computadora como ayuda visual para que los localicen fácilmente. Para realizar estos cálculos necesita utilizar la ecuación que escribió en el tutorial anterior.

La cuarta instrucción es de especial importancia, ya que implica el enlace entre la representación geométrica a la que tiene acceso y la fórmula matemática que dedujo de la actividad anterior, por medio de la comprobación de los resultados. Todos los valores calculados con las herramientas del programa, cambian en forma simultánea con las posiciones o magnitudes de los vectores. Este hecho proporciona otra fuente de información y comprobación a partir de la observación y se aprovecha en la instrucción 5, para hacer visible que los valores calculados pueden ser positivos, negativos o cero, para lo cual debe centrar su atención en la posición de ambos vectores. De nuevo se solicita que exprese en forma escrita el producto de sus observaciones, obligándolo a formular claramente sus pensamientos. Es importante que en este momento advierta la relación entre estos valores (positivo, negativo y cero) y el coseno del ángulo entre los dos vectores, ya que serán algunos de los elementos necesarios para la estructuración del concepto del producto punto.

La parte II presenta dos nuevas formas en que se pueden modificar tanto la magnitud del vector \vec{A} como la del vector \vec{B} . Al modificar la magnitud del vector \vec{A} por medio de cambiar el número que se encuentra en la casilla, cambia la magnitud de la proyección. La segunda forma de cambiar la magnitud del vector \vec{B} es moviendo el punto rojo que vemos en la figura 3, la proyección se duplica, triplica o cuadruplica conforme pasa por los puntos 1, 2, 3, 4 sobre el segmento de recta.

En la primera instrucción, el alumno debe cambiar la magnitud del vector \vec{A} y observar cómo varían los valores calculados en la sección I. En la segunda instrucción cambia los valores del vector \vec{B} , moviendo el punto rojo sobre la línea y se le pregunta en forma explícita: ¿Cómo se relacionan las líneas de colores que aparecen, con la magnitud del vector \vec{B} . Con esto se intenta que el alumno descubra o vea que el número de proyecciones es proporcional a la magnitud del vector y otra vez se pide que escriba una ecuación correspondiente a sus observaciones.



Figura 3. Parte del programa pry3 por medio de la cual el estudiante puede cambiar la magnitud del vector \vec{B} .

En este momento, se le pide que el instructor verifique su respuesta, proporcionando a éste la oportunidad de ampliar y clarificar las ideas, creencias y conceptos que el alumno muestra. Por último se llega a lo que llamamos *institucionalización*, que es la parte formal del concepto, que se hace necesaria debido a que las matemáticas se han escrito en forma de axiomas y teorías que representan toda una base de conocimientos, de la cual no es conveniente alejarse.

TUTORIAL 3: INTEGRAL DE LÍNEA

En los dos tutoriales anteriores se tratan los temas de forma matemática, auxiliados con la interpreta-

ción geométrica que el uso del programa Cabri nos permite, sin embargo, si ubicamos el concepto en un contexto que sea familiar para el estudiante, tal vez la comprensión del mismo sea más efectiva, tenga más significado y quizá tenga un mayor impacto. ya que “Es importante resaltar que enseñar a los estudiantes a que el enfoque principal de sus conocimientos sea hacia diferentes campos de aplicación y de esta forma logre asimilar activamente nuevos materiales para que formen parte de su estructura mental” (Saucedo R., 2005). El grupo que es objeto de esta investigación asiste a la clase de electricidad y magnetismo, por lo cual se decide que el concepto se desarrolle dentro del contexto de potencial eléctrico, en donde es necesario que utilice la integral de línea para calcular la diferencia de potencial entre dos puntos que están dentro de un campo eléctrico, producido por una carga puntual, por una distribución de cargas, o dentro de un campo uniforme producido por dos placas paralelas con la misma densidad de carga pero de signo contrario, conocido comúnmente como capacitor. Para el desarrollo de este tutorial se asume el conocimiento de los factores descritos anteriormente y el objetivo es que visualice la operación conocida como integral de línea en una forma menos convencional y con menor grado de dificultad, ya que conociéndola como la suma de productos punto, ya no es necesario conocer la ecuación de la curva (trayectoria a través de la cual se integra), como tampoco es necesario parametrizar (expresar una variable en función de otra). Si al término de esta serie de trabajos elaborados, el estudiante es capaz de aplicar estos conceptos en la resolución de problemas diversos en diferentes contextos, se habrán logrado los objetivos planteados.

Al igual que en los tutoriales anteriores, en la primera parte del tutorial 3 (Anexo 3) se presentan los elementos con los que se va a trabajar y se dan las instrucciones básicas del funcionamiento de

las instrucciones propias al programa Cabri para el buen desarrollo de este trabajo. En este caso, se presenta en el archivo *A trayectoria1-6* una carga puntual, representada por Q que produce un campo eléctrico y una trayectoria curva para viajar del punto A al punto B, como se puede ver en la figura 4. Se escogen 7 puntos sobre la trayectoria y se representa con vectores el campo que la carga puntual produce en cada uno de los puntos. Se dan las instrucciones para que el estudiante haga que los valores de la carga puntual Q varíen y observe cómo crece o disminuye la magnitud de los vectores campo eléctrico.

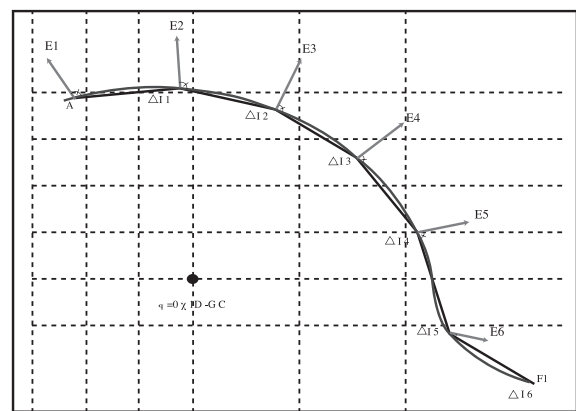


Figura 4. Trayectoria curva AB a través de un campo eléctrico que genera una carga puntual Q en el programa *A trayectoria 1-6* en Cabri.

Utilizando las herramientas correspondientes en Cabri, se pide que el alumno mida la longitud de los segmentos de recta que resultan al unir los puntos consecutivos que fueron seleccionados sobre la trayectoria, a los cuales se les asigna el nombre $\Delta \vec{l}$. Asimismo debe medir el ángulo entre el vector que representa el campo y el último vector definido $\Delta \vec{l}$. Con todos estos datos va llenando la siguiente tabla 1. Para desarrollar las operaciones que en ésta se indican. En el paso 5 se le pide que sume los resultados obtenidos en la última columna, con lo que obtiene:

Tabla 1 Registro de datos correspondientes a valores tomados del Cabri

Magnitud del campo	Longitud	Ángulo	E (Δl) (cos ángulo)
E ₁ =	Δl_1 =		
E ₂ =	Δl_2 =		
E ₃ =	Δl_3 =		
E ₄ =	Δl_4 =		
E ₅ =	Δl_5 =		
E ₆ =	Δl_6 =		

$$\Sigma E (\Delta l) (\cos \theta) = \underline{\hspace{2cm}}$$

Este resultado se deja en espera, para ser utilizado en una comparación al término de la segunda parte, que consiste en abrir el archivo en Cabri llamado *B trayectoria1-6 proy*, en el que se agregan las proyecciones de cada vector campo eléctrico sobre el vector $\vec{\Delta l}$. En este archivo mide la magnitud de la proyección, la multiplica por su correspondiente $\vec{\Delta l}$ y luego lo suma. Este resultado:

$$\Sigma (\text{proyección}) (\Delta l) = \underline{\hspace{2cm}}$$

es el que compara con el anterior. La finalidad es que se dé cuenta de que son dos formas diferentes de llegar a la misma respuesta.

Dado que ya efectuaron el tutorial 2 en el que se institucionalizó:

Llamamos producto punto al resultado de multiplicar la magnitud de un vector por la magnitud de otro vector por el coseno del ángulo entre ellos.

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = \vec{A} \cdot \vec{B} \cos \theta$$

Se concluye: Las expresiones que acabas de escribir corresponden a la suma de productos punto entre los vectores \vec{E} y $\vec{\Delta l}$.

En las partes III y IV se utilizan dos archivos, llamados C trayectoria 1-9 y D trayectoria 1-9 proy respectivamente, en los que el procedimiento es el ya descrito en las partes I y II, la diferencia estri-

ba en que se aumentó el número de puntos sobre la trayectoria y con esto, el número de segmentos $\vec{\Delta l}$. Al aumentar el número de segmentos a 12 en la parte V, se pretende que observe una tendencia, la cual se pide que manifieste en forma de predicción, para enseguida comprobarla o descartarla, efectuando las mediciones y cálculos en el archivo correspondiente E trayectoria 1-12. Se agrega otro archivo llamado G trayectoria1-24 en el que se aumenta el número de segmentos a 24, con las mediciones y operaciones ya efectuadas, ya que sería muy tedioso que el estudiante las calculara de nuevo y no es el objetivo de este trabajo.

La diferencia de potencial se calcula en el paso VI, al parecer en forma aislada, para luego comparar los resultados obtenidos hasta el momento con los que se obtienen al calcular la diferencia de potencial entre los puntos A y B, ubicados en el mismo lugar sobre la misma trayectoria con la misma carga Q que genera el campo \vec{E} . Para lograr esto, se conjuntan los datos en la tabla 2 en la parte VII del tutorial:

Tabla 2. Registro de datos correspondientes a 4 archivos en Cabri.

Trayectoria l	$\Sigma E \cdot \Delta l$	$\Delta V_{AB} = V_B - V_A$	$\Delta V_{AB} - \Sigma E \cdot \Delta l$
6 segmentos			
9 segmentos			
12 segmentos			
24 segmentos			

Las preguntas sucesivas a esta tabla son un intento de que el estudiante exteriorice sus observaciones de forma verbal y matemática. El siguiente paso es muy importante: La transformación de una sumatoria a una integral. Se guía al estudiante a que aplique el conocimiento previo del concepto de integral como el límite de una sumatoria cuando el número de sumandos se aproxima a infinito.

En este caso, al incrementar el número de segmentos la diferencia:

$$\Delta V_{AB} - (\Sigma \vec{E} \cdot \vec{\Delta l}) \quad \text{se aproxima a cero porque } \Delta V_{AB} = (- \Sigma \vec{E} \cdot \vec{\Delta l})$$

Se solicita al estudiante que exteriorice este concepto en forma escrita, la respuesta que se espera es:

$$\Delta V_{AB} = (-\sum \vec{E} \cdot \Delta \vec{l})$$

Y al incrementar a un número muy grande de segmentos:

$$\Delta V_{AB} = -\int \vec{E} \cdot d\vec{l}.$$

Luego se da una oportunidad al instructor para que refuerce, amplíe o corrija este concepto según sea el caso. Después de verificar los resultados, se institucionaliza que:

La integral que se obtiene, resultó de la SUMA DE LOS PRODUCTO PUNTO entre los vectores \vec{E} y $\Delta \vec{l}$ a lo largo de la trayectoria y es conocida como INTEGRAL DE LINEA.

CONCLUSIONES

Los tutoriales descritos se aplicaron en varias sesiones, utilizando para ello las instalaciones del Centro de Informática y Tecnología (CIT) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez en cuatro sesiones. Los trabajos se desarrollaron en equipo, atendiendo a la teoría sustentada por Vigotsky (Glassman M, 2001) en la que afirma que el aprendizaje es un proceso social y que las estructuras cognoscitivas se modifican no por la actividad en si misma sino de la forma en que las herramientas de que se disponen hacen posible esa actividad.

Al aplicar un examen de evaluación para medir la efectividad en el cambio de instrucción observamos que sólo la tercera parte del grupo utilizó la suma de productos punto para resolver este problema.

Lo anterior no se puede tomar como un fracaso, ya que “aún cuando hubo varios intentos de implantar las teorías de Polya relacionada con las heurísticas en el salón de clases, los resultados iniciales no fueron muy alentadores (Santos-Trigo L., 1997)”. Sin embargo, los datos obtenidos nos proporcionan material suficiente para continuar con esta investigación y ahondar más en cada uno

de los problemas de enseñanza-aprendizaje que se nos presentaron. A pesar del esfuerzo realizado tratando de que el estudiante comprenda conceptos matemáticos en contexto en otras disciplinas, nos damos cuenta que aún queda mucho por hacer para establecer un puente entre la enseñanza y los efectos producidos en el aprendizaje.

BIBLIOGRAFIA

- ARTIGUE M. “Problemas y desafíos en educación matemática: ¿Qué nos ofrece hoy la didáctica de la matemática para afrontarlos?” *Educacion matematica*, 16 (3), 5, 2004.
- Douady R. “Juego de marcos y dialéctica herramienta–objeto”. *Ingeniería didáctica en Educación Matemática*. México, 1995.
- Glassman M. “Dewey and Vygotsky: Society, Experience, and Inquiry in Educational Practice”. *Educational Researcher*, **30** (4), 3-14, 2001.
- Jiménez J. “La naturaleza global y dinámica de la derivada como objeto matemático y de enseñanza”. *Mosaicos Matemáticos*, **11**, 2003
- Kanim S., Cohen E. “Factors influencing the algebra ‘reversal error’”. *American Journal of Physics*, 73, 1072-1078, 2005.
- Laborde, C. “Integration of Technology in the Design of Geometry Tasks with Cabri-Geometry”. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, 6 (3), 283-317, 2004.
- Lopez, G. “Computer support for learning mathematics: A learning environment based on recreational learning objects”. *Computers & Education*, 48, 618-641, 2005.
- Santos-Trigo, L. *Principios y métodos de la resolución de problemas en el aprendizaje de las matemáticas*. Grupo Editorial Iberoamérica. 2a edición, México, 1997.
- Saucedo, R. *Una propuesta didáctica para la enseñanza de los problemas de la optimización del cálculo diferencial con Voyage 200*. Tesis de maestría sin publicar, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2005.


ANEXO I

Tutorial 1

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Electricidad y magnetismo Semestre Enero- Junio 2005 TUTORIAL 1 Proyecciones

I. Abre el archivo proyecciones en CABRI .En la figura 1 se muestra un vector, etiquetado \vec{A} (color violeta), una recta perpendicular al eje x (azul) y la proyección del vector \vec{A} sobre el eje x (rojo).




- 1.- Al final del vector \vec{A} , se encuentra un punto rojo. Lo puedes seleccionar con el mouse y moverlo en diferentes direcciones. Observa cómo cambia la proyección y escribe tus conclusiones a continuación:
- 2.- Desplázate con la flecha  hacia la derecha. En la figura 2 puedes mover los puntos rojo y azul. Centra tu atención en la proyección.
 - ¿Qué cambios observas al mover el punto rojo?
 - ¿Y al mover el punto azul?
- 3.- Desplázate de nuevo hacia la derecha. En la figura 3 se encuentran 2 figuras en las que puedes observar la proyección de un vector sobre otro. Aquí puedes cambiar la posición de ambos vectores, seleccionando el extremo de la flecha de cada vector.
 - Observa la proyección en el inciso a): ¿Qué pasa si el vector \vec{A} es menor que el vector \vec{B} ?
 - En ambos incisos: Compara la posición de la línea perpendicular y escribe tus observaciones a continuación:
- 4.- ¿Qué necesitas para conocer la magnitud de la proyección?
- 5.- Escribe una fórmula para calcular la magnitud de la proyección.


ANEXO 2

Tutorial 2

Electricidad y magnetismo Semestre Ene- Jun 2005 TUTORIAL 2 Producto punto

I. Ahora, abre el programa pry3 en CABRI. Aquí puedes mover la posición de los vectores \vec{A} y \vec{B} moviendo los puntos 1 y 2 (en color café). La línea amarilla representa la proyección del vector \vec{A} sobre el vector B.

1. Mide el vector \vec{A} , para lo cual, necesitas presionar el tercer ícono de derecha a izquierda en la parte superior de la pantalla y seleccionar la opción distancia y longitud . Acerca el mouse a un extremo del vector, selecciónalo y luego selecciona el otro extremo.
2. Mide al ángulo entre ambos vectores, presionando el mismo ícono, pero ahora selecciona ángulo . Acerca el mouse al ángulo entre los dos vectores. Presiona el botón izquierdo del mouse cuando aparezcan las palabras “esta marca”.
3. Con estos dos valores, calcula la magnitud de la proyección: Utiliza la calculadora, herramienta que se encuentra en el mismo ícono .

4.- Verifica tus respuestas midiendo la magnitud de la proyección. Utiliza .


5.- Gira el punto 1 a diversas posiciones y observa cómo cambian los valores que acabas de calcular.

¿Cuándo los valores son:


positivos, Negativos o cero?

— Qué explicación darías a cada uno de los casos:

— II. En el lado derecho de la figura, se encuentra la magnitud del vector \vec{A} , cantidad que puedes cambiar si te colocas sobre el número, presionas dos veces el mouse y presionas las flechas hacia arriba o abajo en el cuadro que aparece.

magnitud del
vector A 

También puedes cambiar la magnitud del vector \vec{B} , seleccionando el punto rojo y moviéndolo sobre la recta.


Magnitud del \vec{B}
vector B

1. Cambia únicamente la magnitud del vector \vec{A} y observa cómo varían los valores calculados.

2. Ahora cambia la magnitud del vector \vec{B} y observa lo que pasa:

— ¿Cómo se relacionan las líneas de colores que aparecen con la magnitud del vector B?

— Expresa con una fórmula esta relación:

3. Verifica tu respuesta con tu instructor.

Llamamos PRODUCTO PUNTO al resultado de multiplicar la magnitud de un vector por la magnitud de otro vector por el coseno del ángulo entre ellos.

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}| |\vec{B}| \cos \theta$$

ANEXO 3

Tutorial 3

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Electricidad y magnetismo

Semestre Enero- Junio 2005



TUTORIAL 3

I. Al abrir el archivo A trayectoria1-6 en CABRI, aparece la representación de una carga puntual +Q (círculo negro). Una partícula se mueve desde el punto A hasta el punto B. La trayectoria que sigue esta partícula (en color rojo) está dividida en 6 segmentos ($\Delta 1, \Delta 2 \dots \Delta 6$). Los vectores E 1, E 2, E 3...E 6 (en color violeta) representan el campo que la carga puntual ejerce en cada uno de los puntos marcados sobre la trayectoria.

1. Bajo el punto que representa a la carga puntual se encuentra el valor de esta carga. Lo puedes modificar presionando dos veces sobre el número y presionando hacia arriba o hacia abajo las flechas en el recuadro que aparece



- ¿Qué cambia en la pantalla cuando cambias la magnitud de la carga?
- Escribe una fórmula que represente esta variación.

2. Mide los segmentos de recta en los que se encuentra dividida la trayectoria que sigue la partícula: Selecciona distancia y longitud del tercer ícono de derecha a izquierda en la parte superior de la pantalla.  Acerca el mouse al punto A, cuando aparezca en la pantalla “este punto” con letras rojas, selecciónalo. Acércate al siguiente punto sobre la trayectoria y selecciónalo. En este momento aparece la longitud de este segmento. Mide los demás segmentos en la misma forma.
3. Mide el ángulo entre el vector que representa el campo en cada punto y su respectivo Δl: Selecciona ángulo  en el mismo ícono. Acerca el mouse a la marca de ángulo que se encuentra entre cada par de vectores (E y Δl) y selecciónalo para que aparezca en la pantalla el ángulo correspondiente.
4. Llena la siguiente tabla con las longitudes y los ángulos que mediste. Efectúa las operaciones que se indican en la tabla. En la parte inferior derecha de la pantalla en CABRI se encuentran las magnitudes del campo en cada punto.

Magnitud del campo	Longitud	Ángulo	E (Δl) (cos ángulo)
E ₁ =	Δl ₁ =		
E ₂ =	Δl ₂ =		
E ₃ =	Δl ₃ =		
E ₄ =	Δl ₄ =		
E ₅ =	Δl ₅ =		
E ₆ =	Δl ₆ =		

5. Suma los resultados que obtuviste en la última columna y escríbelo a continuación:

$$\Sigma E (\Delta l) (\cos \theta) = \underline{\hspace{2cm}}$$

II. Ahora, abre el programa B trayectoria1-6 proy. de CABRI. En esta pantalla se encuentra marcada con color amarillo la proyección del vector E sobre el segmento Δl.

1. Escribe la expresión necesaria para calcular la magnitud de la proyección:
2. Calcula las demás proyecciones y llena la siguiente tabla:

	Magnitud de la proyección	(Magnitud de la proy.) (Δl)
E ₁ con Δ l ₁		
E ₂ con Δ l ₂		
E ₃ con Δ l ₃		
E ₄ con Δ l ₄		
E ₅ con Δ l ₅		
E ₆ con Δ l ₆		

3. Suma los resultados de la última columna:

$$\Sigma (\text{proyección})(\Delta l) = \underline{\hspace{2cm}}$$

4. Compara este resultado con el obtenido en la tabla anterior.

- Escribe lo que observas:
- Expresa con fórmulas tus observaciones.
- De acuerdo a los tutoriales anteriores (1 y 2) sobre proyecciones, las expresiones que acabas de escribir corresponden a la SUMA DE LOS PRODUCTOS PUNTO entre los vectores E y Δl .

III En el archivo C trayectoria1-9 de CABRI, una partícula se mueve desde el punto A al punto B siguiendo la misma trayectoria que en el archivo anterior, pero ahora se encuentra dividida en 9 segmentos.

1. Escribe la expresión que utilizas para calcular el campo eléctrico en cada uno de los puntos:

- Los vectores violeta representan el campo eléctrico en cada punto y su magnitud la puedes encontrar en la parte inferior derecha de la pantalla.
- Verifica una o dos de estas magnitudes, midiendo y haciendo los cálculos necesarios.

2. Mide la longitud de cada uno de los segmentos, así como su correspondiente ángulo. Coloca los resultados de estas mediciones en la siguiente tabla:

3. Suma los resultados de la última columna y anótalo a continuación:

$$\Sigma E (\Delta l) (\cos \theta) = \underline{\hspace{2cm}}$$

En el archivo trayectoria D trayectoria1-9 proy., puedes observar en color amarillo, la proyección de cada vector campo sobre su correspondiente Δl

1. Calcula la magnitud de cada una de las proyecciones y llena la tabla:

	E	Δl	θ	$E (\Delta l)(\cos \theta)$
E ₁ con Δl				
E ₂ con Δl				
E ₃ con Δl				
E ₄ con Δl				
E ₅ con Δl				
E ₆ con Δl				
E ₇ con Δl				
E ₈ con Δl				
E ₉ con Δl				

2. Haz una predicción acerca de la suma de los resultados en la última columna con respecto a la tabla anterior y escríbela en el espacio siguiente:

	Proyección	Δl	(Proyección) (Δl)
E_1 con Δl_1			
E_2 con Δl_2			
E_3 con Δl_3			
E_4 con Δl_4			
E_5 con Δl_5			
E_6 con Δl_6			
E_7 con Δl_7			
E_8 con Δl_8			
E_9 con Δl_9			

3. Comprueba tu predicción efectuando la suma:

$$\Sigma (\text{proyección})(\Delta l) = \underline{\hspace{2cm}}$$

— Expresa con fórmulas tus observaciones:

$$\underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

De acuerdo a los tutoriales anteriores (1 y 2) sobre proyecciones, las expresiones que acabas de escribir corresponden a la suma de los PRODUCTOS PUNTO entre los vectores E y Δl .

V. Ahora abre el archivo E trayectoria1-12. Aquí se incrementó el número de divisiones de la trayectoria a 12.

1. Si sigues el mismo procedimiento con este archivo que con los anteriores (medir, anotar y sumar ¿Cómo crees que será la suma de los resultados obtenidos, con respecto a los resultados obtenidos en los archivos anteriores?

2. Comprueba tus predicciones, llenando la tabla siguiente:

	E	Δl	θ	$E(\Delta l)$ ($\cos \theta$)	proyección	(proy.) (Δl)
E_1 con Δl_1						
E_2 con Δl_2						
E_3 con Δl_3						
E_4 con Δl_4						
E_5 con Δl_5						
E_6 con Δl_6						
E_7 con Δl_7						
E_8 con Δl_8						
E_9 con Δl_9						
E_{10} con Δl_{10}						
E_{11} con Δl_{11}						
E_{12} con Δl_{12}						
			$\Sigma E \Delta l$ $\cos \theta$	=	Σ proyección Δl	=

— Abre el archivo G trayectoria1-24 y observa los resultados.

3. ¿Qué crees que ocurre si incrementamos el número de divisiones cada vez más?

— Cuando el número de divisiones crece infinitamente, la expresión $\sum E (\Delta l) (\cos \theta)$ cambia a: _____
 Y la expresión $\sum (\text{proyección}) (\Delta l)$, a: _____

VI. POTENCIAL ELECTRICO. Abre el archivo F trayectoria1-pot. En este archivo se muestra la misma carga puntual (punto negro) y los mismos puntos A y B con los que has estado trabajando (en color azul).

1. Mide la distancia r_A de la carga puntual al punto A.
2. Escribe la expresión que necesitas utilizar para calcular el potencial eléctrico en un punto:
3. Calcula el potencial eléctrico en el punto A:

Trayectoria l	$\sum E \cdot \Delta l$	$\Delta V_{AB} = V_B - V_A$	$\Delta V_{AB} - \sum E \cdot \Delta l$
6 segmentos			
9 segmentos			
12 segmentos			
24 segmentos			

$V_A =$ _____

4. Mide la distancia r_B de la carga puntual al punto B y calcula el potencial en el punto B:

$V_B =$ _____

5. Calcula la diferencia de potencial entre el punto A y el punto B:

$\Delta V_{AB} = V_B - V_A =$ _____

6. Compara este resultado con el que obtuviste en la tabla de la parte V. Y escribe tus observaciones a continuación:

7. Escribe una conclusión en base a tus observaciones.
8. Expresa tus conclusiones con una expresión algebraica (fórmula):

_____ = _____

— Verifica tus conclusiones con tu instructor.

VII. Llena las columnas 1 y 2 con los datos que obtuviste y resta las dos cantidades para obtener la tercera columna:

1. ¿Qué observas en la tercera columna? ¿Los valores que anotaste se aproximan a un valor? Si la respuesta es afirmativa, ¿A que valor se aproximan?
2. Expresa lo anterior en forma verbal:
3. Expresa lo anterior en forma matemática:
4. Si incrementamos el número de segmentos, lo anterior se puede escribir de la siguiente forma:
— Verifica tus resultados:

La integral que se obtiene, resultó de la SUMA DE LOS PRODUCTO PUNTO entre los vectores E y Δl a lo largo de la trayectoria y es conocida como INTEGRAL DE LÍNEA

Instructions to Authors

The Editorial Board of the journal **Ciencia en la Frontera: Revista de Ciencia y Tecnología de la UACJ**, invites authors to submit manuscripts under three categories: research articles, short manuscripts (which will be short articles showing results of undergraduate thesis and written by the undergraduate students, reviewed by their advisers), and invited reviews. Manuscripts should be sent to the Editor in Chief, according to the following specifications:

1. Papers should be from original research and with scientific content.
2. Once published, articles cannot be published elsewhere in the same form, in any language, without the consent of UACJ publishers.
3. Papers may be: research articles, short manuscripts and invited reviews, belonging to the fields of natural or exact sciences (biology, life sciences, chemistry, mathematics, physics, etc). Final decisions concerning acceptability of the manuscripts will be made by the Editorial Board.
4. Papers may be written in English, Spanish or any Romance language. If a translation to Spanish is submitted, the text in original language should also be provided. Abstracts written both in Spanish and English should also be provided.
5. Originals are not sent back.
6. If the author fails to respond to the final comments of the Editorial Board of *Ciencia en la Frontera: Revista de Ciencia y Tecnología de la UACJ*, the journal can make editing changes which do not modify the original content of the article.
7. Papers should meet the following format:
 - Short and concise title, written in both English and Spanish or Romance languages.
 - A brief abstract between 40 and 150 words, which should also be written in both languages.
 - Name and nationality of authors.
 - Affiliation of authors, including highest degree and research field of all authors.
 - Author affiliations should be included as footnotes starting from number 1.
 - Ex. Ramírez, J. L.¹ y Martínez, R.²
1 Universidad de Puebla, México.
2 Universidad de Santiago Compostela, España.
 - Footnotes should be posted at the bottom left side of the page where they are mentioned.
 - Specify type of paper, i.e. Research article, Short manuscript or Invited Review.
 - Postal address of the corresponding author, which includes: telephone, fax and e-mail. Corresponding author should be highlighted with an asterisk (*) mark.
 - Manuscripts should be submitted in triplicate, printed in one side only, letter or A4 size paper, double-spaced, with margins of 3 cm.
 - A disk copy of the manuscript in Win/Word 6.0 or higher, should also be provided. Figures and tables should be sent in Excel or WinWord 97, each saved in a different file.
 - For Research articles, manuscript length should be between 10 and 30 pages, plus figures and tables. Short manuscripts should be shorter than 10 pages, plus figures and tables.

- Figures and tables should be mentioned in the text, and numbered in arabic numbers. The software in which they were created, should be mentioned.
- Figure and table legends should be concise and understandable, and should be listed at the end of the manuscript (after references).
- Bibliographic references should be quoted in the text by writing the last name of the first author and publication year between parenthesis. References will be included at the end of the text, ordered alphabetically.
- In references for book titles, capital letters should be used only at the beginning of the title and on authors names.
- When using abbreviations, the full meaning of them should be provided, when mentioned for the first time.
- Bibliographic references should be forma-

ted as follows:

BOOK REFERENCES:

Author's last name, name (year). "*Book title*". City: Editorial. Total pages.

Ex:

Foucault, Michael (1984). "*Las palabras y las cosas*". México: Siglo XXI. pp. 200.

BOOK SECTION REFERENCES:

Author's last name, first name (year). "*Section title*". En: Editor's name and last name (ed.). *Book title*. City: Editorial. pages.

Ex:

Levine, Frances (1991). "*Economic perspectives on the Comanchero trade*". En: Catherine A Spielmann (ed.). *Farmers, hunters and colonists*. Tucson, AZ: The University of Arizona Press. 155-169.

JOURNAL REFERENCES:

Auhor's last name, fist name(s) initial(s); other authors. (year). "Article's title". *Journal abbreviation*, volume, pages.

Ex:

Sagara, Y., Fernandez-Belda, F., de Meis, L. e Inesi, G. (1992). "Characterization of the inhibition of intracellular Ca²⁺ transport ATPases by thapsigargin". *J. Biol. Chem.*, 267, 12606-12613.

Rivas-Cáceres, R. (1999). "Médanos de Samalayuca. Un urgente reclamo, una estrategia emer-

Normas de publicación para los autores

El comité editorial de la revista **Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ**, acoge con gusto, propuestas de artículos para su publicación, bajo dos modalidades artículos de investigación y avances de investigación (artículos derivados de tesis de pregrado, escritos por los estudiantes y avalados por sus asesores). Las normas establecidas para la publicación son las siguientes:

1. Los trabajos deberán ser de *calidad científica e inéditos* avalados por un investigador de carrera.
2. Una vez publicado el artículo, los derechos de autor pasan a la UACJ.
3. Los artículos pueden ser de fondo (artículos de investigación), revisiones invitadas (actualizaciones en temas de investigación) o comunicaciones breves (avances de investigación), los cuales deberán referirse a las áreas de ciencias naturales y exactas, ajustándose al dictamen del comité editorial, el que evalúa su contenido científico de calidad y decide sobre la pertinencia de su publicación.
4. Los trabajos pueden ser enviados para su publicación en el idioma inglés, el español u otras lenguas romances. Si se envía una traducción al español, hay que adjuntar el texto también en forma original. Los artículos deberán incluir resumen en español seguido de uno en inglés (y viceversa).
5. No se devuelven los originales.
6. En caso de que el autor no responda después de haberse presentado las correcciones o dudas de su trabajo, la revista *Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ*, se reserva el derecho de hacer los cambios de edición

sin modificar el contenido original de la obra.

7. Los trabajos deben ajustarse a los siguientes requisitos (de no cumplirse con ellos, no se considerarán para su publicación):
 - Título del trabajo, breve y conciso en inglés y español
 - Un resumen del contenido de una extensión aproximada de 40 palabras como mínimo y 150 palabras como máximo que deberá estar en inglés y español.
 - Nombre y nacionalidad del autor
 - Adscripción de todos los autores, incluyendo el máximo grado de estudios y área de especialización.
 - La institución de adscripción de los autores participantes deberá incluirse como un pie de página, comenzando con el número 1.
 - Ejem. Ramírez, J. L.¹ y Martínez, R.²
1 Universidad de Puebla, México.
2 Universidad de Santiago Compostela, España
 - Los pies de página, que denotan tanto la institución de adscripción, como ciertos tipos de notas, etc; aparecerán en el margen inferior izquierdo de la página en que sean mencionados.
 - Naturaleza del trabajo: artículo de investigación, avance de investigación, etc.
 - Dirección para correspondencia que incluya: teléfono, fax y correo electrónico. El nombre del autor al cual se dirigirá la correspondencia debe indicarse con un asterisco (*).

- Presentar 3 originales impresos en una sola cara, en papel Bond tamaño carta o A4, a doble espacio y con márgenes de 3 cm.
- Adjuntar el texto con una copia del trabajo en disquete, en formato Win/Word 6.0 en adelante, los cuadros y figuras en hoja de Excel o Win/Word 97 en adelante. Cada figura deberá estar grabada en un archivo individual.
- La extensión del trabajo deberá ser de un mínimo de 10 cuartillas de texto más las figuras, y de un máximo de 30 cuartillas más las figuras para un artículo de investigación. La extensión de los avances de investigación deberá ser de un máximo de 10 cuartillas de texto más las figuras.
- Las ilustraciones, cuadros y fotografías, deberán referirse dentro del texto, enumerándose en el orden que se cita en el mismo, e indicar el programa de cómputo en el que están elaborados.
- Los pies de figura deberán ser claros de forma que se entiendan sin necesidad de leer el texto. Estas deberán incluirse en un listado después de la bibliografía.
- Las referencias bibliográficas deben asentarse de la forma convencionalmente establecida en español, es decir, indicando estas en el cuerpo del texto con los apellidos del primer autor y año de publicación entre paréntesis, y los datos bibliográficos al final del escrito. La bibliografía se presenta al final del artículo por orden alfabético.
- Al citar los títulos de libro, se deben utilizar mayúsculas solo al inicio y en nombres propios.
- Al menos la primera vez, se deben proporcionar la equivalencia de las siglas empleadas en el texto, en la bibliografía y en los cuadros y las figuras.
- Distribuir los datos de las referencias bibliográficas de la siguiente manera:

REFERENCIA DE LIBRO:

Apellidos, nombre del autor (año). “*Título del libro*”. Lugar: Editorial. Número de páginas totales.

Ejemplo:

Foucault, Michael (1984). “*Las palabras y las cosas*”. México: Siglo XXI. Pp. 30-45.

REFERENCIA DE CAPÍTULO DE LIBRO:

Apellidos, nombre del autor (año). “*Título del capítulo*”. En: Nombre y apellido del editor (ed.). *Título del libro*. Lugar: Editorial. Páginas.

Ejemplo:

Levine, Frances (1991). “*Economic perspectives on the Comanchero trade*”. En: Catherine A Spielmann (ed.). *Farmers, hunters and colonists*. Tucson, AZ: The University of Arizona Press. 155-169.

REFERENCIA DE REVISTA:

Apellido(s) del autor, inicial(es); otros autores. (año). “Título del artículo”. *Nombre de la revista*, abreviado según el citation index o como aparezca en el artículo original, volumen, páginas.

Ejemplos:

Sagara, Y., Fernandez-Belda, F., de Meis, L. e Inesi, G. (1992). “Characterization of the inhibition of intracellular Ca²⁺ transport ATPases by thapsigargin”. *J. Biol. Chem.*, 267, 12606-12613.

Rivas-Cáceres, R. (1999). Médanos de Samalayuca. Un urgente reclamo, una estrategia emergente. *Ciencia en la Frontera*, 1, 29-32.

