

# Análisis de la red logística de un cruceo vial utilizando simulación en SIMIO para evaluar la alternativa de colocar un semáforo

L.Fuentes-Rosas<sup>1</sup>, A.G. López-Cabrera<sup>1</sup>, L.G. Tobón-Galicia<sup>1</sup>, C.G. Moras-Sánchez<sup>2</sup>.

**Resumen**—Se realizó un estudio de simulación en SIMIO para evaluar la viabilidad de colocar un semáforo en un cruceo de la Ciudad de Tierra Blanca, Veracruz, México. Dicho cruceo presenta la problemática de congestionarse fuertemente en determinadas horas del día causando serias implicaciones a la seguridad vial tanto de los conductores como de peatones. Se siguió la metodología de simulación propuesta por Law y Kelton (2014) y con un 95% de confianza se obtuvo un modelo representativo del sistema real. Las medidas de desempeño fueron evaluadas bajo los criterios de Cal y Mayor y Cárdenas (2007) para la implementación de un semáforo logrando el cumplimiento por arriba del 80% de cada una de ellas, sustentando la colocación del semáforo como alternativa viable para contrarrestar la problemática del cruceo.

**Palabras claves**—Logística, SIMIO, Simulación, vialidad.

**Abstract**—A SIMIO simulation study was conducted to evaluate the feasibility of placing a traffic light on a roader cruise in the City of Tierra Blanca, Veracruz, Mexico. This cruise presents the problem of being heavily congested at certain times of the day causing serious implications for road safety for both drivers and pedestrians. The simulation methodology proposed by Law and Kelton (2014) was followed and with 95% confidence a representative model of the system was obtained. Performance measures were evaluated under the criteria of Cal and Mayor and Cardenas (2007) for the implementation of a traffic light achieving compliance of over 80% of each of them, supporting the placement of the traffic light as a viable alternative to counteract the problem of the cruise.

**Keywords**—Logistics, road, SIMIO, simulation.

## I. INTRODUCCIÓN.

El transporte, tan necesario en la vida del hombre actual, puede generar diversos impactos ambientales adversos, tales como congestión vehicular, invasión de la tranquilidad en ciertas áreas, además de incrementar el riesgo de accidentes viales.

El flujo vehicular [1] producido en un momento y lugares determinados es el resultado de una serie de decisiones

individuales de los usuarios de la red logística vial. Cada usuario decide cómo y cuándo recorrer lo que considera la mejor ruta para llegar a su destino. La congestión de tránsito ha ganado terreno en todo el mundo y el pronóstico es que seguirá agravándose, constituyendo un peligro para la calidad de vida urbana. El fenómeno se traduce en el incremento de tiempo de viajes, el aumento en el consumo de combustible, costo por contaminación entre otros, en comparación con el flujo vehicular libre.

El elevado volumen de vehículos que circula por las ciudades hace imprescindible que en éstas existan sistemas de gestión semafórica que intenten que la circulación sea lo mejor posible [2].

Con el objetivo de ofrecer alternativas favorables a la seguridad vial, varios estudios se han realizado y han tenido como técnica base a la simulación. En la ciudad de Orizaba, Veracruz, México, se evaluó la eficiencia del programa de cruces uno por uno versus semáforos, resultando que a partir de 330 vehículos por hora, resulta más eficiente el programa de semáforos [3].

En [4] se analizó el control de tráfico vehicular y presentaron estrategias de gestión semafórica; concluyendo que la utilización de semáforos inteligentes descongestiona la circulación vehicular.

La simulación utilizando SIMIO permitió conocer medidas de desempeño de un sistema vial para justificar la instalación de un semáforo en un cruceo cuya característica era la recurrencia de accidentes [5].

Se evaluó el tráfico vehicular en un redondel de una ciudad de Ecuador, con el objetivo de mejorar la circulación y disminuir los conflictos. Los resultados del estudio apuntaron a la implementación de un enlace vehicular y semaforizar sectores internos para un flujo más regulado [6].

## II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Un estudio de simulación supone un procedimiento apegado al rigor científico. La metodología de simulación

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Maestría en Ingeniería Industrial, Prol. De Avenida Veracruz s/n Esq. Héroes de Puebla, Colonia Pemex, C.P. 95180, Tierra Blanca, Veracruz, México.

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Maestría en Ingeniería Industrial, Oriente 9, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320, Orizaba, Veracruz, México. \* [Liliana.fuentes@itstb.edu.mx](mailto:Liliana.fuentes@itstb.edu.mx).

consta de 10 pasos a seguir [7], tal como se muestra en la Figura 1.

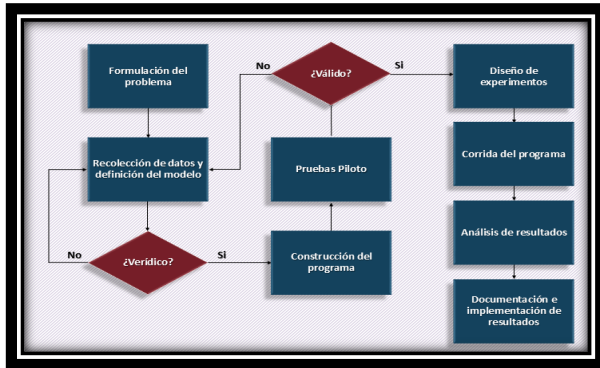


Figura 1. Metodología de Simulación (Adaptado de Law, 2014)

A. Formulación del problema

El sistema bajo análisis se integra por la intersección de dos arterias viales (Calle Lerdo de Tejada y Av. Independencia), la Figura 2 ilustra los sentidos viales del cruceo.

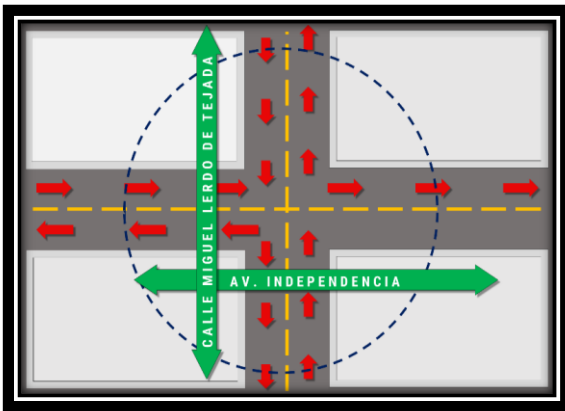


Figura 2. Sistema bajo estudio, cruceo en Tierra Blanca, Ver.

La gran cantidad de vehículos que transita el cruceo, la falta de dispositivos reguladores de tráfico y la incipiente cultura vial, propician que dicho cruceo sea un desafío constante a la seguridad. El objetivo del estudio de simulación consistió en modelar el sistema tal cual opera y posteriormente evaluar la viabilidad de colocación de un semáforo, avalado por los principios de la Ingeniería de Tránsito.

B. Recolección de datos y definición del problema

Las variables de entrada en la red logística del cruceo son: a) Tiempos entre llegadas (arribos) de vehículos al cruceo. En este caso se identificaron tres: tiempo de arribo por Lerdo dirección norte, tiempo de arribo por Lerdo dirección sur, tiempo de arribo por Independencia; b)

Destino del vehículo; c) Tiempo de estacionamiento (en caso de que lo haga); d) Número de peatones por hora en el cruceo.

Para cada una de las variables se diseñó un instrumento de recolección y se tomaron datos durante tres meses en horarios variados durante el día. Las bases de datos de cada variable fueron tratadas estadísticamente a fin de conocer su comportamiento (posible ajuste a alguna distribución), para tal análisis se utilizó el paquete estadístico *Stat::Fit@*, Ver Figura 3.

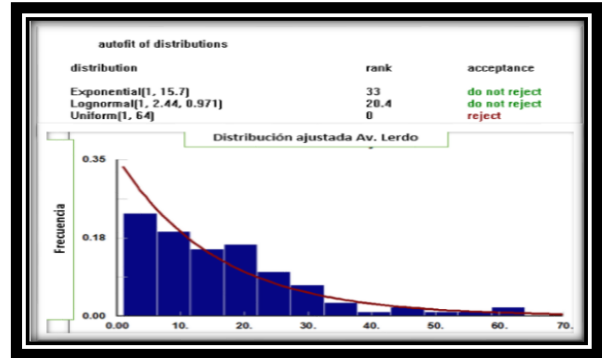


Figura 3. Histograma de la distribución de la variable tiempo entre llegadas por Calle Lerdo-Sur

Las pruebas que comprendió el tratamiento estadístico fueron Chi-cuadrada, Kolmogorov Smirnov y Anderson Darling. Del tratamiento se obtuvo que todas las variables se ajustaron a distribuciones teóricas conocidas.

La red logística que implica el cruceo se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 4.



Figura 4. Diagrama de flujo del cruceo bajo estudio

C. Verificación del modelo

El diagrama de flujo fue presentado y explicado al Director de Tránsito y Vialidad de la ciudad, quien avaló el proceso, sosteniendo la congruencia del modelo con el sistema real.

D. Construcción del programa

Una vez verificado el modelo el siguiente paso fue la traducción de éste a lenguaje de programación de SIMIO, la Tabla 1 refiere los elementos principales que fueron necesarios programar para la obtención del modelo de simulación (MS).

TABLA I  
ELEMENTOS PRINCIPALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MS

Elemento del sistema	Elemento en SIMIO®
Llegadas por arterias viales	Sources
Areas de estacionamiento	Servers
Direcciones viales	Paths
Vehículos y peatones	Models Entities
Cambio de direcciones	Transfers Nodes
Salidas del sistema	Sink

SIMIO® ofrece la ventaja de un ambiente windows, además de una animación 3D muy atractiva. La figura 5 muestra una vista del modelo de simulación.



Figura 5 Vista 3D del MS en SIMIO®

E. Pruebas piloto

Se realizaron pruebas piloto al MS para garantizar la programación correcta de cada elemento y, principalmente, para tener información para el siguiente paso.

F. Validación del modelo

La validación del modelo es un procedimiento matemático cuya importancia radica en asegurar que los datos que arroja el MS son estadísticamente iguales a los del sistema real, dotando así de un modelo capaz de emular al sistema real y ser una herramienta eficaz en la toma de decisiones. Para la validación se utiliza la prueba t-pareada, mediante la que se prueba la hipótesis nula de que no hay diferencia entre los datos del MS y los del sistema real. Todas las variables deben ser sometidas a validación. El procedimiento de la validación de una de ellas se muestra en la Tabla 2, donde:

$X_i$ = tiempo promedio de arribos en segundos por calle Lerdo del sistema real.

$Y_j$ = tiempo promedio de arribos en segundos por calle Lerdo del modelo de simulación.

TABLA II  
DATOS APAREADOS DE LA VARIABLE TIEMPO DE ARRIBOS EN SEGUNDOS POR CALLE LERDO

Corridas	DATOS		$Z_j = X_i - Y_j$	$(Z_j - \bar{Z}_{10})^2$
	Reales	Simulados		
1	14	22	-8	146.41
2	12	7	5	0.81
3	26	4	22	320.41
4	12	10	2	4.41
5	4	7	-3	50.41
6	2	5	-3	50.41
7	1	13	-12	259.21
8	14	8	6	3.61
9	36	14	22	320.41
10	12	2	10	34.81
TOTAL				1190.9
PROMEDIO			4.1	

Con los datos de la Tabla II se construyó un intervalo de confianza al 95% para Z en donde  $Z_j = X_i - Y_j$ , como se muestra en (1), (2), (3) y (4).

$$\hat{V}ar[\bar{Z}_{10}] = \frac{\sum_{i=1}^{10} [z_j - \bar{z}_{10}]^2}{n(n-1)} \quad (1)$$

$$\bar{Z}_{10} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\hat{V}ar(\bar{Z}_n)} \quad (2)$$

$$4.1 \pm 2.2622 \sqrt{13.2322} \quad (3)$$

$$(-4.129, +12.329) \quad (4)$$

Dado que el intervalo resultante incluye al cero no es posible el rechazo de la hipótesis nula, por lo que se concluye que con un nivel de confianza del 95% se tiene un modelo válido, representativo del sistema real, y que cualquier diferencia es estadísticamente insignificante y se debe a fluctuaciones aleatorias.

G. Diseño de experimentos

Para tomar decisiones, una vez validado el MS, es necesario conocer el número de replicaciones (simulaciones independientes), para tal propósito se utilizó el procedimiento de estimación de la media  $\mu = E(x)$  con un error específico. Si el estimador  $\bar{X}$  es tal que  $|\bar{X} - \mu| = \beta$ , entonces se dice que  $\bar{X}$  tiene un error absoluto  $\beta$ . Si se asume que el estimador de la varianza poblacional no cambia apreciablemente a medida que el número de replicaciones se incrementa, una expresión aproximada para el número total del replicaciones  $n * \beta$  requerido para obtener un error absoluto de  $\beta$  es dado por (5):

$$n * (\beta) = \min\{i \geq n: t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{s_{(n)}^2}{i}} \leq \beta\} \quad (5)$$

Así es posible determinar  $n \cdot \beta$ , incrementando  $i$  en uno hasta que un valor  $i$  se obtiene para el cual (6):

$$t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{s^2(n)/i} \leq \beta \quad (6)$$

Para el cálculo del número de replicaciones se utilizó una muestra de 10 datos de la variable tiempo promedio entre arribos de la calle Lerdo (Ver Tabla III), con un error absoluto de 2.00 segundos y un nivel de confianza de 90%. Cuyo resultado se muestra en (7).

TABLA III  
DATOS DE LA VARIABLE TIEMPO DE ARRIBOS EN SEGUNDOS POR CALLE LERDO

Corridas	Tiempos entre arribos
1	28.157
2	10.669
3	7.7938
4	6.0943
5	7.8743
6	6.5333
7	41.3529
8	18.7905
9	17.951
10	3.5633
Media	14.87794
Varianza	143.75182

$i=120$

$$1.660 \sqrt{143.7518/120} = 1.8168 \leq 2.00 \quad (7)$$

Por lo tanto el número óptimo de replicaciones fue de 120.

**H. Corridas del programa**

El MS fue corrido 120 veces.

**I. Análisis de resultados y Documentación**

Si la instalación y operación de los semáforos es correcta, éstos podrán aportar diversas ventajas, en cambio, si uno o más semáforos son deficientes, provocarán entorpecimiento de tránsito tanto de vehículos como de peatones [8].

Los requisitos, que de acuerdo a la Ingeniería de Tránsito, deben evaluarse para la implementación de un semáforo son:

**Requisito 1. Volumen mínimo de vehículos.** La intensidad del tránsito de las vías que se cruzan es la principal justificación.

**Requisito 2. Interrupción del tránsito continuo.** Se aplica cuando las condiciones de operación de la calle principal son de tal naturaleza que el tránsito en la calle secundaria

sufre demoras o riesgos excesivos al entrar o cruzar la calle principal.

**Requisito 3. Volumen mínimo de peatones.** La afluencia de peatones que cruzan la calle por hora.

**Requisito 4. Circulación progresiva.** Distancia mínima requerida entre el semáforo más próximo.

**Requisito 5. Antecedentes de accidentes.**

**Requisito 6. Combinación de los requisitos anteriores.** Cuando ninguno de los requisitos anteriores se cumple al 100% pero dos o más se satisfacen en un 80%.

Los primeros tres requisitos se satisfacen cuando, durante cada una de las ocho horas de un día representativo se alcanzan los volúmenes mínimos indicados en la Tabla IV y que corresponden a valores de zona urbana.

La Tabla IV muestra la evaluación de los requisitos de Cal y Mayor y Cárdenas versus el MS.

TABLA IV  
COMPARACIÓN DE LOS REQUISITOS DE CAL Y MAYOR Y CÁRDENAS VERSUS MS/SISTEMA REAL  
(NOMENCLATURA: CP= CALLE PRINCIPAL; CS=CALLE SECUNDARIA; IT=INGENIERÍA DE TRÁNSITO)

<b>Requisito 1: Volumen mínimo de vehículos</b>					
Vehículos por hora	Requisito IT		MS		Cumplimiento %
	CP	CS	CP	CS	
	600	200	856	446	
<b>Requisito 2: Interrupción del tránsito continuo</b>					
Vehículos por hora	Requisito IT		MS		Cumplimiento %
	CP	CS	CP	CS	
	900	100	856	446	
<b>Requisito 3: Volumen mínimo de peatones</b>					
Peatones	Requisito IT		MS		Cumplimiento %
	Núm. de peatones en ocho horas	Vehículos por hora	Núm. de peatones en ocho horas	Vehículos por hora	
	150 o +	600	150 o +	446	
<b>Requisito 4: Circulación progresiva</b>					
Distancia del semáforo más próximo	Requisito IT		Sistema real		Cumplimiento %
	+ de 300 metros		- de 300 metros		
<b>Requisito 5: Antecedentes de accidentes</b>					
Accidentes	requisito IT		Sistema real		Cumplimiento %
	5 o más en los últimos 12 meses		3 accidentes en los últimos 30 días		
<b>Requisito 6: Combinación de requisitos anteriores</b>					
Combinación de requisitos	Requisito IT		Sistema real		Cumplimiento %
	Al menos dos o más requisitos se satisfacen en un 80%		Tres requisitos se cumplen al 100%		



### III. RESULTADOS

Con un 95% de confianza se obtuvo un modelo de simulación representativo del sistema real y con base en el análisis de los resultados de dicho modelo, se tiene la evidencia para sustentar que la colocación de un semáforo en el cruce de la Avenida Independencia con calle Lerdo, resultará en una buena decisión para mejorar la vialidad y ofrecer seguridad a los usuarios, toda vez que se dio cabal cumplimiento en un 100% a cuatro de los seis requisitos que propone la Ingeniería de Tránsito.

### IV. DISCUSIÓN, CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

La simulación es una técnica versátil, no solo aplicable a sistemas productivos o de transformación, el presente artículo muestra su aplicación a un sistema vial cuyos resultados, en caso de implementarse, colaborarán en la consecución de una vialidad segura.

Mediante la simulación fue posible la evaluación de los requisitos para que la instauración del semáforo logre que la vialidad en el cruce sea segura, de esta manera se pone en evidencia que la ciencia y la tecnología son de gran ayuda y relevancia para lograr mejores condiciones de vida.

Cabe mencionar que el simulador SIMIO® fue de gran apoyo para el estudio de simulación, ofreciendo una programación amigable y una animación muy realista.

El impacto de trabajos de esta índole favorece enormemente la vinculación entre universidad y sector productivo, en este caso, dependencia gubernamental, puesto que se muestra el sistema con tal realismo que logra que los escenarios que se prueben sean apreciados con un apego impresionante a la realidad.

Se recomienda ampliamente a las autoridades de la ciudad que promuevan una cultura vial, pues definitivamente, solo a través de la educación se lograrán avances importantes en materia de seguridad. También se recomienda el estudio pertinente para determinar el ciclo del semáforo considerando para ellos los cálculos correspondientes.

### V. AGRADECIMIENTOS

Al titular de la Dirección de Tránsito y Vialidad de la Ciudad de Tierra Blanca, Veracruz, México, por las facilidades ofrecidas y el apoyo durante la toma de datos.

### VI. REFERENCIAS

- [1] Universidad Nacional Autónoma de México (2005), Instituto de Ingeniería. Tráfico vehicular. Disponible en: <http://www.ejournal.unam.mx/cns/no70/CNS07004.pdf>
- [2] Chanca, J. (2006). Simulación microscópica de tráfico urbano, presentado en XV jornadas del CEA-IFAC. Disponible en: <http://www.ceiaf.ac/actividades/jornadas/XV/documentos/34-ososareast.pdf>
- [3] Moras, C.G. y Ojeda, I. (2007). Evaluación de la eficiencia del programa de tránsito "cruces uno por uno", en la ciudad de Orizaba,

Veracruz, México, mediante microsimulación. *Revista de la Ingeniería Industrial*, 1(1), pp. 9-19. Consultado de:

<https://drive.google.com/drive/u/0/folders/0B4GSS5FQQLi9fmIHSFBsRVUwNzEtY25aVkZrYTYyQVJBSTUvZl1RkFvamFHdUdR VHcwMVk>

- [4] Franco, L. (2008). Aplicación de Simulación en el Control de Tráfico, una Propuesta para Ciudad del Este. *FPUNE Scientific*, (4), pp. 75-82. Consultado de: <http://www.une.edu.py:83/fpunescientific/index.php/fpunescientific/article/view/35/34>
- [5] Fuentes, L., Tobón, L.G., Rojas, L. y Moras, C.G. (2017). Simulación con SIMIO aplicada a la vialidad de una ciudad. *Theorema*. 21(3), pp. 32-37. Consultado de: [https://docs.wixstatic.com/ugd/38df4a\\_c0b098874012470285340d9b5dca5492.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/38df4a_c0b098874012470285340d9b5dca5492.pdf)
- [6] Rodríguez Intriago, K., Oyola Estrada, E., Ordoñez Fernández, J., y Espinoza Urgiles, F. (2018). Descongestionamiento vehicular del redondeo el bananero mediante enlace vehicular en la avenida 25 de Junio. *Conference Proceedings*, 2(2). Consultado de <http://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/article/view/270>
- [7] Law, A. (2014). *Simulation Modeling and Analysis. Fifth Edition*. Estados Unidos de América: McGraw-Hill.
- [8] Cal y Mayor, R. y Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones*, Octava Edición. México: Alfaomega.

### VII. BIOGRAFÍA



**Fuentes Rosas, Liliana.** Es candidata a Doctora en Ciencias de la Administración por la Universidad Cristóbal Colón, Veracruz, México. Maestra en Ciencias en Ingeniería Administrativa y Licenciada en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz, México.

Ella actualmente labora en el Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca, Veracruz, México, en la División de Posgrado e Investigación en la Maestría de Ingeniería Industrial. Las líneas de investigación de su interés son: simulación y redes logísticas, estadística aplicada y productividad humana.

La Maestra Fuentes pertenece al Colegio Nacional de Ingenieros Industriales (CONAI), a la Sociedad de Ergonomistas de México A.C. (SEMACE) y a la Red Iberoamericana de Academias de Investigación (REDIBAI). Es Perfil Deseable por PRODEP y líder del Cuerpo Académico Productividad y Mejora continua.



**López Cabrera, Anibal Gaudencio.** Es maestrante de Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz, México. Licenciado en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca, Veracruz, México.

El actualmente labora en el Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca, Veracruz, México, en la División de Ingeniería Industrial. Las líneas de investigación de su interés son: simulación y redes logísticas, estadística aplicada e Inteligencia Artificial.

El maestro López pertenece a la Sociedad de Ergonomistas de México A.C. (SEMACE) y a la Red Iberoamericana de Academias de Investigación (REDIBAI).

**Tobón Galicia, Lucila Guadalupe.** Es Doctora en Administración y



Desarrollo Empresarial por el Colegio de Estudios Avanzados de Iberoamérica, Xalapa, Veracruz, México. Maestra en Ingeniería Industrial y Licenciada en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz, México.

Ella actualmente labora en el Instituto Tecnológico Superior de Tierra Blanca, Veracruz, México, en la División de Posgrado e Investigación en la Maestría de Ingeniería Industrial. Las líneas de investigación de su interés son: simulación y redes logísticas y estadística aplicada.

La Doctora Tobón pertenece a la Red Iberoamericana de Academias de Investigación (REDIBAI). Es Perfil Deseable por PRODEP y miembro del Cuerpo Académico Productividad y Mejora continua.



**Moras Sánchez, Constatino Gerardo.** Es Maestro en Ingeniería Industrial por Tech University, Texas, Estados Unidos y Licenciado en Ingeniería Industrial por la Universidad de las Américas, Puebla, México.

El actualmente labora en el Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz, México, en la División de Posgrado e Investigación en la Maestría de Ingeniería Industrial. Las líneas de investigación de su interés son: simulación de procesos.

El Maestro Moras Es Perfil Deseable por PRODEP y miembro de un Cuerpo Académico consolidado.