



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

---

---

FACULTAD DE CONTADURÍA, ADMINISTRACIÓN E INFORMÁTICA  
MAESTRÍA EN OPTIMIZACIÓN Y CÓMPUTO APLICADO

## **Análisis y Estudio del Tránsito Vehicular Usando Autómatas Celulares y Redes Neuronales**

**T E S I S**

Que para obtener el Grado de  
Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado

Presenta

**EDUARDO JESUS KAU CANUL**

Director de Tesis

DR. OUTMANE OUBRAM

Co-Director

DR. NOUREDDINE LAKOUARI

Revisores:

DR. FEDERICO ALONSO PECINA

DRA. LORENA DÍAZ GONZÁLEZ

DR. JOSÉ ALBERTO HERNÁNDEZ AGUILAR



CUERNAVACA, MORELOS

JUNIO, 2022



Cuernavaca, Morelos a 30\_de Junio del 2022.

**DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO**  
**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN DE LA F.C.A.e I.**  
**PRESENTE**

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la **Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado**, del **estudiante Eduardo Jesus Kau Canul**, con matrícula **10036989**, con el título **Análisis y Estudio del Tránsito Vehicular Usando Autómatas Celulares y Redes Neuronales** por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente  
**Por una humanidad culta**  
*Una universidad de excelencia*

**Dr. Outmane Oubram**  
**Profesor- investigador de Tiempo Completo**  
**Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería**



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

**Sello electrónico**

OUTMANE OUBRAM | Fecha:2022-07-01 11:26:39 | Firmante  
bu7mJa20fCzpsnRSSqSJYAGLVoweQpMoPwwUO4P969vCbOzEKtZ58iI1BMXmDva3/P0pIXtonUKvJ2B6cLSSJ4hpMIWfQJf1BKoUDOfu4Wytvnc41vXLmdiaVcVPc3HD  
vZowTcMXTRIPLHXJelLkZJRjOycKIEIVdhFVfVutoHhMUvcoSiMjBYW5MConMREdOL4kU9GVLGUKYQ00huJqAYIHg6z12yGteWTC1Y3tVfPKP5x8RTaSSy7OYAaGzTEEja  
8ZHJmXyY0dCkVtUWH5eCz56fEzW24naxudPEl5gdav9kyk0vxygZYU1qvtlqclQlew8/KxFdEog--

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR Ingresando la siguiente clave:



RZzeEClq6

<https://efirma.uaem.mx/noRepudlo/ywv4Xkq214hqlwYNAu0r1616EVGBCI>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



Cuernavaca, Morelos a 04 de julio del 2022.

**DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO**  
**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN DE LA F.C.A.e I.**  
**PRESENTE**

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la *Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado*, del *estudiante Eduardo Jesus Kau Canul*, con matrícula *10036989*, con el título *Análisis y Estudio del Tránsito Vehicular Usando Autómatas Celulares y Redes Neuronales* por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente  
*Por una humanidad culta*  
*Una universidad de excelencia*

**Dr. Noureddine Lakouari**  
**instituto nacional de astrofísica óptica y electrónica**



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

**Sello electrónico**

NOUREDINE LAKOUARI | Fecha:2022-07-04 04:37:05 | Firmante  
ISTV2WH9e7zm2sTCdidDlCzywUeCmLkEokIF5IVUtWkCBto8neQ2+VMPRHVyuomgDkGtJAjlpZ70UPj6rgYx6IXrBaEsRh2KFOIATZ59okdBM3JytkJ1nVSHZDK9IA760cRQ3I  
YYOdKagqvAT3yB4lr5sxA9k8kTSS9S1rgd1a23YE1Fn7yVWldOPsIWzjI4wOM3Zi2kNst0tpEXGV3rq1rdK+eVHsveLibYlIhhG3pQKQOZL010pJHK6Tkly6twx1QiyZeuTpsV5PdI  
U348jEXbUR75T1IKbAZON90yNZxpMYhikNOO4h7Mpx7tpL4HONnLahFae2YA--

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



vA8Rtoc7x

<https://refirma.uaem.mx/noRepudio/8r6rcCYRughKGPCcZFzjOAXx2vqJRRAT>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



Cuernavaca, Morelos a 4 de julio del 2022.

**DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO**  
**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN DE LA F.C.A.e I.**  
**PRESENTE**

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la **Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado**, del **estudiante Eduardo Jesus Kau Canul**, con matrícula **10036989**, con el título **Análisis y Estudio del Tránsito Vehicular Usando Autómatas Celulares y Redes Neuronales** por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además, construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente  
**Por una humanidad culta**  
*Una universidad de excelencia*

**Dr. Federico Alonso Pecina**  
**Profesor- investigador**  
**Facultad de Contaduría, Administración e Informática**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

#### Sello electrónico

FEDERICO ALONSO PECINA | Fecha:2022-07-04 13:24:51 | Firmante  
luerg8XWoc3q0Ap4ufnlibB9NpGLbyu+zXs46ffp0osEqM99IVvdJ9picRDn+xCZ9wgtz7uVjGwodloCPAsZTePqPpCcrQaMU1y8RbrCMUsP+ddd3cqpLgIWPCkxUu0rbsHqT2sSvz8  
gax9XgL+7CimAd1V+QzzYPB1w6LaFDF2joOIEVV1O6Rg3nizLm++yuVhFD9Wk9H4AsE/EY84o7ks0Q6iutCLQrJQT/5BILw/qddLb+apj0AUjpcHGCKEmYsDrHjLpLUo0AqRW+h  
ofVMN4Jjuq4T1IEQky6ICVE1MUwmXjQ9XSwuCSeovRmOrncxtfEj306zzjFLg--

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



EO12dt4J3

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/u0up1YMQbeEJefgyR72EEIyyuZ6g0>

UA  
EM

Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



Cuernavaca, Morelos a 27 de 07 del 2022.

**DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO**  
**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN DE LA F.C.A.e I.**  
**PRESENTE**

En mi carácter de revisora de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la **Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado**, del **estudiante Eduardo Jesus Kau Canul**, con matrícula **10036989**, con el título **Análisis y Estudio del Tránsito Vehicular Usando Autómatas Celulares y Redes Neuronales** por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además, construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente  
**Por una humanidad culta**  
*Una universidad de excelencia*

**Dra. Lorena Díaz González**  
**Profesora- investigadora**  
**Centro de Investigación en Ciencias-IICB**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

#### Sello electrónico

LORENA DIAZ GONZALEZ | Fecha:2022-07-27 15:48:33 | Firmante  
P2RRXzLkGf67WAMIXIF1STW1xkiAQagOVtrPH4R7T75DGuXVA+z9fz6L27NHnZfeTs1MWxbl5YuhqDnSsMSyVWx+3fRkFC4M4bJ8A/UDZrDvVMYdQRkFG9iCsJKI568F6JB  
GpyMN6itLmKCN8Du/anRbKGF46EYWujcZR6Q2O14m0VQYYeCHDWGA9QOn36PCqkXhMdnwprEp22rJ5k/4XjVVLvSyDi6blqRQOatsmDQVsuVe4S17wm4SFLVtYcADUQc  
174qxYP89HYMUihTE3295EEG2EG7RvEfOM/TELSkjKrlLryo+WzsaddulqmJ7agwY/DNCikWw--

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[TeUpwOCPJ](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/otwPBz84ie07OtB4lIEPhEsb9HVY1UC8>

UA  
EM

Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



Cuernavaca, Morelos a 28 de Julio del 2022.

**DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO**  
**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN DE LA F.C.A.e I.**  
**PRESENTE**

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la **Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado**, del **estudiante Eduardo Jesús Kau Canul**, con matrícula **10036989**, con el título **Análisis y Estudio del Tránsito Vehicular Usando Autómatas Celulares y Redes Neuronales** por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente  
*Por una humanidad culta*  
*Una universidad de excelencia*

**Dr. José Alberto Hernández Aguilar**  
**Profesor- investigador**  
**Facultad de Contaduría, Administración e**  
**Informática**

Av. Universidad 1001 Chamilpa Cuernavaca Morelos México C.P. 62209, Edificio 19  
Tel. (777) 329 7917, Ext. 3038, 3039/ posgrado.fcae@uaem.mx





Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

#### Sello electrónico

JOSE ALBERTO HERNANDEZ AGUILAR | Fecha:2022-07-29 09:00:42 | Firmante  
B0wVwcy38BhgATH0wRdHNM/kd51GHr9niEK7P0PjLyLYtAIU5u2sFnsMAWDiwudtSKQjM+v06imYVkmmsE+e9ckVsdQqnLxzLac2BX9pk7Xdm2AI0tzoIKR6hMWYTAAlw  
IkePcRZT.0YxbkFr29YvmGNTFZbCkRvPhok7jMSdW3inDfVazjHOB8A5xLEr6NoT9IFszWgW6EvOVAOta56XjJKOeh2T9ip6l5wWoX8NxAbZPooqvDh5txPA9uvnxDC53pSnsHv  
U6VVD2V3L7chlZ5E7cbhmXID1LjYkRcSxS29r1+gkLbn3mNuf8nvXjgUnA6DDRZrseDahgQ---

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



3HVSSchIF

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/MeLcV5aRkRYNjpgqXwfkSer7qGs2r2>



## **Agradecimientos**

A mi director de tesis, el Dr. Outmane Oubram, con quien estoy infinitamente agradecido por haberme aceptado como su tesista, su motivación constante, el enorme apoyo y tiempo brindado durante la maestría y la elaboración de este documento de tesis.

A mi codirector de tesis, el Dr. Nouredine Lakouari, por haberme introducido en el interesante tema de los autómatas celulares. De igual manera, le agradezco sus enseñanzas, tiempo y paciencia durante la realización de este documento.

A mi comité tutorial, la Dra. Lorena Díaz, el Dr. Federico Alonso y el Dr. José Hernández; quienes dieron seguimiento a mis avances durante el tiempo que este trabajo fue elaborado.

Al Dr. Alí Bassam, sin usted no estaría alcanzando esta nueva meta profesional.

A la secretaria de Investigación y Posgrado de la Facultad de Contaduría, Administración e Informática (FCAeI) por admitirme en la Maestría en Optimización y Computo Aplicado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de maestría.

A mi mamá, la Mtra. Lariza Francelia Canul Arévalo, por impulsarme a alcanzar nuevas metas, por apoyarme infinitamente durante esta etapa de mi formación profesional, por sus enseñanzas y por su amor incondicional.

A mis hermanas, Judith y Laura, por escucharme, aconsejarme y alentarme siempre.

A mi novia, Guadalupe Llavén, por alentarme e incentivar me durante este proceso.

## Resumen

El tránsito vehicular (también llamado tráfico vehicular) es un fenómeno causado por el flujo de vehículos a través de las vías de tráfico vehicular (VTV) (autopistas, carreteras, caminos, etc.). La congestión en las VTV es el estado del tráfico vehicular más conocido y es ocasionado cuando la capacidad de las VTV es rebasada por la demanda de uso. La congestión del tráfico vehicular (o congestión del tráfico) suele ser un fenómeno común en las ciudades y es relacionado con una buena economía. Sin embargo, la congestión del tráfico generalizada y predominante incrementa el tiempo de viaje, costos de operación, emisiones de gases contaminantes y el consumo de combustible. Entonces, la reducción de la congestión del tráfico beneficia a varios sectores de la población.

Uno de los elementos del tráfico que juega un papel importante en los embotellamientos son las intersecciones. Estos son los cuellos de botella de las carreteras urbanas, contribuyendo a la pérdida de tiempo de viaje debido al control, gestión e interferencia del tráfico

En este trabajo se ha estudiado el fenómeno del tráfico en dos tipos de intersecciones: intersección con prioridad de cruce e intersección con sistema de semáforos. Se ha abordado una perspectiva microscópica, es decir, desde el punto de vista de la interacción vehículo-vehículo. Se ha utilizado el autómatas celular como modelo de simulación. También se ha implementado un modelo de emisiones de gases de escape y un modelo de consumo energético.

Con los datos obtenidos del autómatas celular se han podido obtener los diagramas fundamentales de estos dos tipos de intersección bajo diferentes condiciones de tráfico. Los diagramas fundamentales han ayudado a entender el comportamiento de las emisiones de CO<sub>2</sub> y del consumo energético generadas en diferentes condiciones de tráfico. Los resultados sugieren que, bajo condiciones similares de tráfico, la intersección con prioridad de cruce tiene un mayor flujo, menor consumo energético y menores emisiones de CO<sub>2</sub> que en la intersección con semáforos.

Por último, los datos generados se han utilizado para entrenar tres redes neuronales para cada tipo de intersección; la primera es capaz de predecir el flujo vehicular, la segunda predice el consumo energético y la tercera las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## Tabla de contenido

Tabla de contenido.....	I
Lista de Figuras.....	II
Lista de tablas.....	III
Introducción.....	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis.....	3
1 Modelación del flujo de tráfico.....	4
1.1 Clasificación de modelos.....	4
1.1.1 Modelos macroscópicos.....	4
1.1.2 Modelos microscópicos.....	4
1.2 Autómata Celular: Modelo de simulación del tráfico.....	4
1.2.1 Tipos de sistemas.....	5
1.2.2 Modelo de autómata celular Nagel- Schreckenberg Modificado.....	5
1.3 Redes Neuronales Artificiales.....	8
1.3.1 Neurona simple.....	9
1.3.2 Neurona con múltiples entradas.....	9
1.3.3 Funciones de activación.....	10
1.3.4 Regla Delta.....	11
1.3.5 Red Neuronal Artificial.....	11
1.3.6 Retro propagación.....	12
1.4 Modelo de consumo de combustible.....	12
1.4.1 Propiedades del vehículo.....	13
1.4.2 Modelo de consumo instantáneo de combustible.....	14
1.5 Modelo de emisiones.....	15
2 Metodología.....	16
2.1 Autómata celular NaSchM con medición de consumo y de emisiones de escape.....	17
2.2 Intersección.....	17
2.3 Intersección con prioridad.....	18
2.4 Intersección con semáforos.....	19
2.5 Generación de la base de datos.....	19
2.6 Arquitectura de la Red Neuronal Artificial.....	21

3	Resultados y descripción .....	23
3.1	Autómata Celular: Intersección con regla de prioridad .....	23
3.2	Autómata Celular: Intersección con semáforo .....	27
3.3	Comparativo .....	31
3.4	Modelo de RNA .....	32
4	Conclusiones.....	38
	Referencias.....	39
A.	Anexo A .....	42

## Lista de Figuras

Figura 1.1:	Interpretación gráfica de un circuito.....	5
Figura 1.2:	Ejemplo del proceso del modelo NaSch.....	7
Figura 1.3:	Partes principales de una neurona: dendritas, cuerpo celular y axón (Biggs et al., 2011). .....	9
Figura 1.4:	Diagrama de una Neurona artificial Simple .....	9
Figura 1.5:	Descripción del funcionamiento de una neurona artificial compuesta por m entradas (May, 2020). .....	10
Figura 1.6:	Diagrama esquemático de una red neuronal multicapa (May, O., 2020).....	12
Figura 2.1:	Diagrama de flujo metodología de entrenamiento RNA .....	16
Figura 2.2:	Diagrama de flujo del modelo NaSchM más el modelo de consumo y el modelo de emisión. ....	17
Figura 2.3:	Intersección con priorida; En esta figura se muestra el caso cuando no hay un conflicto entre vehículos. ....	18
Figura 2.4:	intersección con prioridad, segundo caso; El sistema resuelve que vehículo cruzara la intersección cuando s tiene un conflicto en la intersección. ....	18
Figura 2.5:	Intersección con semáforos; se puede observar la dinámica de cruce de los vehículos a través de la intersección, donde solo cruzarán lo vehículos de la vialidad con semáforo en luz verde. ....	19
Figura 2.6:	Diagrama de flujo del Autómata Celular.....	20
Figura 2.7:	Arquitectura de Red Neuronal Artificial general.....	22
Figura 3.1:	Curvas de flujo y emisión vs probabilidad de entrada de la vialidad 1 para la estrategia de intersección con prioridad de cruce.....	25
Figura 3.2:	Diagrama de espacio tiempo para $\alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$ y $P_c = 1$ .....	26
Figura 3.3:	Diagrama de espacio tiempo para $\alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$ y $P_c = 1$ .....	26
Figura 3.4:	Diagrama de espacio tiempo para $\alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$ y $P_c = 0.5$ .....	27
Figura 3.5:	Curvas de flujo y emisión vs probabilidad de entrada de la vialidad 1 para la estrategia de intersección con semáforo.....	29
Figura 3.6:	Diagrama de espacio tiempo para $\alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$ y $P_c = 0.7$ .....	30

Figura 3.7: Diagrama de espacio tiempo para $\alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$ y $P_c = 0.5$ .....	30
Figura 3.8: Diagrama de espacio tiempo para $\alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$ y $P_c = 0.3$ .....	31
Figura 3.9: Comparación estadística entre el flujo del AC y las estimadas por la RNA SF-5-10-2 ....	34
Figura 3.10: Curvas de flujo, emisión y consumo para la estrategia de intersección con prioridad de cruce.....	36
Figura 3.11: Curvas de flujo, emisión y consumo para la estrategia de intersección con semáforo.	37

### Lista de tablas

Tabla 1.1: Resumen de los parámetros de los vehículos. ....	13
Tabla 3.1: Resumen de valores promedio para la estrategia de intersección con prioridad de cruce .....	31
Tabla 3.2: Resumen de los valores promedio para la estrategia de intersección con semáforo .....	32
Tabla 3.3: Parámetros de la RNA SE-5-10-2 .....	33
Tabla 3.4: Resumen de las RNAs entrenadas.....	33
Tabla A.1: Pesos y bias de RNA SF-5-10-2 .....	42
Tabla A.2: Pesos y bias de RNA SE-5-10-2 .....	42
Tabla A.3: Pesos y bias de RNA SC-5-10-2.....	43
Tabla A.4: Pesos y bias de RNA PF-5-10-2.....	43
Tabla A.5: Pesos y bias de RNA PE-5-10-2.....	44
Tabla A.6: Pesos y bias de RNA PC-5-10-2.....	44

## Introducción

El dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero (GEI) que se emite a raíz de las actividades del ser humano (Yoro & Daramola, 2020). El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) se encuentra de manera natural en la atmósfera y es una de las tantas formas del carbono. Este es aprovechado por las plantas, a través de la fotosíntesis, para generar compuestos orgánicos. A su vez, los animales que se alimentan de las plantas incorporan este material a su organismo. Y estos reincorporan el  $\text{CO}_2$  al medioambiente a través de la respiración, sus desechos e inclusive cuando mueren (Conde, 2014). A esta circulación natural del carbono se le conoce como el ciclo del carbono, aunque es aún más complejo que lo descrito anteriormente. Debido a las actividades del ser humano, el ciclo del carbono se ha alterado, ya que estas suman más emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera e impactan en la capacidad de absorción de los sumideros de  $\text{CO}_2$ .

Según Lamb (Lamb, et al., 2021) las actividades del ser humano que contribuyen a las emisiones de  $\text{CO}_2$  pueden ser clasificadas en 5 sectores principales: Energético, industria, construcción, transporte y AFOUS (agrícola, forestal y otros usos de suelo). En este estudio Lamb comenta que las emisiones de  $\text{CO}_2$  en 2018 alcanzaron las 58 Gigatoneladas a nivel global. Donde, el sector del transporte contribuyó con el 14% de las emisiones. A su vez, el subsector de transporte carretero contribuyó con el 10% (es decir, el 73% de su grupo). De 2010 a 2018 este subsector ha tenido una tendencia de crecimiento de 1.9% por año. Esta tendencia no se verá reducida hasta que se tomen acuerdos internacionales que promuevan la reducción de emisiones de  $\text{CO}_2$  y hasta que tecnologías más limpias se vuelvan más económicas que las convencionales (Santos, 2017). Mientras tanto el sector transporte seguirá siendo uno de los grandes retos para el calentamiento global.

Incorrectamente, de manera coloquial, se habla indistintamente de calentamiento global y cambio climático como sinónimos. El cambio climático es una consecuencia del calentamiento de la temperatura global. Es decir, este aumento de temperatura en la superficie del planeta genera cambios en otros parámetros del sistema climático que en consecuencia afectan al clima (Molina et al., 2017). El calentamiento global tiene múltiples consecuencias negativas en los sistemas físicos, biológicos y humanos, entre otros. La consecuencia más conocida es el derretimiento de la masa de hielo de los polos que en consecuencia provocará el aumento del nivel del mar (Acciona, s. f.) Con más de 600 millones de habitantes viviendo en costas, cualquier incremento en el nivel del mar podría afectar y desplazar una gran cantidad de población. Varios son los peligros asociados al incremento en el nivel del mar. Tales como, el aumento de las mareas, intrusión de agua salada en pozos de agua subterráneas, inundaciones ocasionales, periódicas o permanentes y erosión costera (Hauer, et al., 2020). Un ejemplo alarmante, es la desaparición de la isla New Moore que se encontraba ubicada en la bahía de Bengala. Durante 40 años, la India y Bangladesh pelearon su soberanía hasta que en 2010 se reportó la inmersión de la isla (RT en español, 2015). La inmersión de esta se atribuye a la erosión y el cambio climático (Hazra, 2016). Con respecto al área de la agricultura, algunos modelos predicen sequías en regiones agrícolas importantes debido a los cambios en los patrones del clima. Adicionalmente, el incremento de la temperatura global podría influir en los patrones de reproducción, desarrollo y propagación de plagas relacionadas a la agricultura y de otras actividades (Skendžić et al., 2021), lo que se podría traducir en pérdida de cultivos, incremento de precios y problemas de accesibilidad alimenticia.

La reducción de las emisiones de  $\text{CO}_2$  en el sector del transporte puede lograrse mediante la aplicación de diversas estrategias. Desde el punto de vista tecnológico, en el mercado existen tecnologías más eficientes y limpias como los vehículos eléctricos de batería (VEB) que emiten entre 10 y 26 veces

menos CO<sub>2</sub> que los vehículos de combustión interna (VCI) (Teixeira & Sodré, 2018) o los vehículos híbridos que en condiciones de conducción urbana consumen menos combustible, pero emiten niveles de CO similares a su homólogo VCI (Huang et al., 2019). Aunque los vehículos eléctricos son más eficientes, aún presentan varios retos, el principal es la viabilidad económica ya que son una mejor opción para el consumidor sólo si son más baratos que los VCI, por lo que se requieren incentivos gubernamentales para lograr este punto (Ghosh, 2020). Desde el punto de vista de la logística, la reducción de las emisiones de GEI y del consumo de energía del tráfico vehicular se conoce como el Problema de Rutas de Vehículos Verdes (GVRP por sus siglas en inglés). En el marco del GVRP, se han desarrollado modelos que combinan flotas de VE y VCI (Macrina et al., 2019) e incluso se han implementado algoritmos genéticos para optimizar las rutas de reparto y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> (de Oliveira Da Costa et al., 2018).

La simulación del tráfico vial es una herramienta que puede apoyar a mejorar los sistemas de transporte y por ende ayudar a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Un ejemplo que fue mediático es el ocurrido a principios del año 2022 (Prego, 2022), donde un youtuber polaco utilizó el videojuego “cities: skylines” para simular un proyecto de interconexión vial gubernamental. Esto con el fin de evaluar a viabilidad del proyecto. Este encontró que había puntos que mejorar y logró que las autoridades frenaran la obra hasta no tener una mejor evaluación. Lo cierto es que la simulación del tráfico no es una disciplina nueva y existen herramientas de simulación especializadas en este rubro. En 1984 wolfram propuso la famosa regla 184, el cual es uno de los autómatas celulares (AC) más fundamentales de los modelos de tráfico (Higashi et al., 2021). Posteriormente, en 1992 Biham (Biham, et al., 1992) desarrollaría un AC bidimensional, donde los vehículos circulan: de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo en una matriz. En ese mismo año, Nagel y Schreckenberg (Nagel & Schreckenberg, 1992), presentarían un AC unidimensional (modelo NaSch), para la simulación del tráfico en autopistas, capaz de reproducir el fenómeno de “stop and go”. Este se volvería uno de los modelos de AC más conocidos y usados en la simulación del tráfico. En 2002 Kerner (Kerner et al., 2002) expondría las reglas para una AC de tres fases, derivado de sus observaciones del comportamiento del tráfico vial en las autopistas de Alemania (Kerner & Rehborn, 1996). El modelo NaSch contempla dos fases: flujo libre (F) y flujo congestionado (C). Sin embargo, kerner comenta que el flujo congestionado se divide en otras dos fases: flujo sincronizado (S) y amplios atascos en movimiento (J). Para actualizar el modelo NaSch, Chmura (Chmura et al., 2014) propuso modificaciones al modelo NaSch (NaSchM) que ampliarían su alcance a la teoría de tres fases. Lo cierto es que la simulación del tráfico vial ha atraído múltiples grupos de investigación que han ampliado el alcance de este modelo. No solo en el estudio de los fenómenos del tráfico, sino que, al implementar modelos de emisiones de gases de escape (Panis et al., 2006) se ha podido conocer la influencia que los elementos de control de tráfico tienen en este proceso. Algunos autores han estudiado la influencia de topes (Pérez-Sansalvador et al., 2020), rotondas y semáforos (Lakouari et al., 2019) y contrastado estrategias de semáforos (Binoua et al., 2020).

En este trabajo se estudia el comportamiento del tráfico vehicular y sus emisiones bajo la influencia de dos estrategias de control de tráfico: intersección con prioridad e intersección con semáforo y se utiliza el modelo NaSchM con condiciones de frontera abiertas.

## **Objetivo general**

Buscar las diferentes estrategias para mejorar la calidad del tráfico, minimizar el consumo energético y reducir las emisiones de gases de escape, en una intersección con dos vialidades bajo las estrategias de cruce: semáforo e intersección con prioridad.

## **Objetivos específicos**

1. Diseñar un modelo de autómeta celular, considerando el flujo dinámico en una intersección con un sistema de semáforos e intersección con prioridad como los elementos de control de flujo vehicular, para determinar su consumo energético y reducir las emisiones de escape.
2. Entrenar una red neuronal para predecir el flujo vehicular, emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo energético del tráfico vehicular.

## **Hipótesis**

Si tenemos un modelo que describa la realidad del comportamiento del tránsito vehicular en una intersección se podría disminuir el consumo energético y reducir las emisiones de gases de escape.

# **1 Modelación del flujo de tráfico**

## **1.1 Clasificación de modelos**

Los modelos de tráfico pueden ser clasificados con respecto a su nivel de abstracción de la realidad, al respecto, se puede hablar de tres clasificaciones 1) Modelos macroscópicos, 2) Modelos mesoscópicos y 3) Modelos microscópicos. Sin embargo, estos se pueden agrupar en dos modelos principales: macroscópicos y microscópicos.

### **1.1.1 Modelos macroscópicos**

Los modelos macroscópicos describen el flujo del tráfico haciendo la analogía de que este se puede comportar como un líquido o un gas. Estos modelos se centran, principalmente, en describir los fenómenos de la congestión, los retrasos y la formación de colas. Aunque estos modelos son capaces de describir de manera colectiva el fenómeno del tráfico, estos no toman en cuenta la personalidad del conductor o patrones de conducción individuales, los cuales son un factor importante en el flujo vehicular (Mohan y Ramadurai, 2013).

### **1.1.2 Modelos microscópicos**

Los modelos microscópicos describen el comportamiento y la interacción de cada vehículo (aceleración, frenado o cambio de carril) con otros vehículos y su medio, lo cual hace que el modelado sea más detallado. Uno de los modelos más populares es el de seguimiento de vehículos, el cual examina el movimiento longitudinal de cada vehículo. Sin embargo, con el desarrollo de la ciencia de computación se comenzó a extender el uso del modelo de autómatas celulares (Mardiati, et al., 2014).

## **1.2 Autómata Celular: Modelo de simulación del tráfico.**

Un autómata celular (AC) es un sistema dinámico discreto en el que el espacio se divide en celdas espaciales regulares y el tiempo progresa en pasos discretos. Cada celda del sistema tiene uno de un número finito de estados. El estado de cada celda se actualiza de acuerdo con las reglas locales, es decir, el estado de una celda en un momento dado depende de su propio estado y de los estados de sus vecinos en el paso de tiempo anterior. Es decir, en cada paso de tiempo cada autómata evoluciona independientemente de los otros pasos de tiempo a un nuevo valor que es función de los valores del autómata en un vecindario apropiado. Estos incluso han sido propuestos como una manera alternativa discreta para expresar reglas físicas (Liu, 2008).

### 1.2.1 Tipos de sistemas

Los AC de simulación de tráfico (ACST) usan un arreglo o vector (“array” en inglés) como espacio de evolución. Según sea el caso, se puede realizar una simulación de un circuito (sistema cerrado) o de una vialidad con principio o fin (sistema abierto).

#### 1.2.1.1 Sistemas Cerrados

En los sistemas cerrados los vehículos que se encuentren cerca del final del arreglo y tengan velocidad suficiente para salir de este son regresados al inicio del arreglo o a una celda que emule la distancia recorrida por el vehículo dada una velocidad  $v_i$ . En estos sistemas el numero de vehículos se mantiene estático durante toda la simulación haciendo que, de igual forma, la densidad de vehículos se mantenga estable.

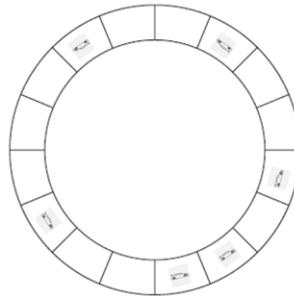


Figura 1.1: Interpretación gráfica de un circuito.

#### 1.2.1.2 Sistemas abiertos

En los sistemas abiertos los vehículos van ingresando y saliendo del arreglo según una regla dada. Para que los vehículos ingresen, la primera celda del vector tiene que estar vacía y se tiene que cumplir que la probabilidad de ingreso es menor que  $\alpha$ . Para que los vehículos salgan de la vialidad, estos deben de tener la velocidad suficiente y la probabilidad de salida debe de ser menor a  $\beta$ .

### 1.2.2 Modelo de autómata celular Nagel- Schreckenberg Modificado

En 1992, Nagel y Schreckenberg (Nagel y Schreckenberg, 1992) propusieron un modelo de autómata celular del tráfico. Este simulaba una vialidad de un solo carril y la densidad de vehículos dentro de esta se mantenía constante a lo largo de una prueba con sus respectivas iteraciones; es decir, el sistema era cerrado. En la Figura 1.2 se muestra un ejemplo del modelo NaSch. La Figura 1.2a se toma como punto de inicio, en este se puede observar que los números que se encuentran en la primera fila corresponden a las velocidades de los vehículos que se encuentran representados gráficamente en la segunda fila. Como dato adicional, se ha agregado una tercera fila donde se especifica la posición

o el número de cada celda. Es decir, en la primera celda se encuentra el primer vehículo, el cual tiene una velocidad “2”. En la cuarta celda, se encuentra el segundo vehículo cuya velocidad es “0”, en la sexta celda, se ubica el tercer vehículo con una velocidad “1” y el último vehículo está en la séptima celda y tiene una velocidad “2”. La tercera fila, así como las columnas de información no se mostrarán en las siguientes subfiguras. Las reglas del modelo son cuatro, y son las siguientes:

1. Aceleración:

Si la velocidad del vehículo  $n$  es menor que  $V_{max}$ , la velocidad de avance es  $V_n + 1$ . Es decir:

$$\text{Si } V_n < V_{max} \text{ entonces}$$

$$V_n \rightarrow \min(V_n + 1, V_{max})$$

En la Figura 1.2b se ilustra la transición entre el estado inicial y el estado cuando se ha aplicado la regla de aceleración. Se puede observar que el primer y cuarto vehículo ( $V_1$  y  $V_4$  respectivamente), desde el estado inicial, ya cuentan con la velocidad máxima ( $V_1 = V_4 = 2$ ) por lo que no tienen cambio en su velocidad. Sin embargo, el segundo vehículo tenía una velocidad igual a cero ( $V_2 = 0$ ), pero al aplicarle la regla de aceleración incremento una unidad de velocidad, es decir, su velocidad actual sería igual a 1 ( $V_2 = 0 \rightarrow V_2 = 1$ ). Para el tercer vehículo, sucede algo similar de tener una velocidad igual a 1 incrementa a 2 ( $V_3 = 1 \rightarrow V_3 = 2$ ).

2. Frenado

Si el vehículo  $n$ , en el sitio  $i$ , tienen a un vehículo  $n + 1$  delante de él a una distancia  $d_n < V_n$  entonces el vehículo  $n$  reducirá su velocidad lo suficiente para evitar la colisión. Esto se puede ver de la siguiente forma:

$$V_n \rightarrow \min(V_n, d_n)$$

La Figura 1.2c muestra cuando se aplica la regla de frenado. Esto se puede observar en el tercer y cuarto vehículo. Recordemos que de la regla 1, el tercer vehículo adquirió la velocidad  $V_3 = 2$ . Sin embargo, la distancia que hay entre el tercer y cuarto vehículo es  $d_3 = 0$ . Por tanto,  $V_3 = 0$ . Para el cuarto vehículo, se tiene que la distancia que hay entre este y el primer vehículo es  $d_4 = 1$ . Por tanto,  $V_4 = 1$ .

3. Aleatorización

Dada una probabilidad  $P$ , la velocidad de cada vehículo (si es mayor a cero) decrece en 1. En otras palabras:

$$\text{Si } V_n > 0 \text{ entonces}$$

$$V_n \rightarrow \max(V_n - 1, 0)$$

Si hacemos  $P = 1/4$ , un cuarto de los vehículos en la vialidad debería de disminuir su velocidad en una unidad. A modo de ejemplo, el vehículo en la cuarta posición se ha seleccionado debido a la probabilidad. En este caso  $V_4 = 1 \rightarrow V_4 = 0$ . Esto se ilustra en la Figura 1.2d.

4. Movimiento (configuración en el tiempo  $t + 1$ )

Cada vehículo avanza  $V$  sitios. A saber:

$$X_n \rightarrow X_n + V_n$$

Ya que se han aplicado las reglas anteriores, se procede a mover los vehículos según las velocidades asignadas. En este caso, el primer vehículo se moverá dos celdas (de  $V_1 = 2$ ). Mientras que el segundo vehículo se moverá 1 celda (a partir de  $V_2 = 1$ ). Por último, el tercer y cuarto vehículo no se moverán (ya que  $V_3 = V_4 = 0$ ).

a)

Velocidad	2			0		1	2	
Representación gráfica								
Número de Celda	1	2	3	4	5	6	7	8

b)

2			1		2	2	
							

c)

2			1		0	1	
							

d)

2			1		0	0	
							

e)

		2		1	0	0	
							

Figura 1.2: Ejemplo del proceso del modelo NaSch

Este modelo tiene la capacidad de reproducir la transición espontánea del flujo libre al congestionamiento. Sin embargo, debido a la desaceleración del paso 3 se producen atascos espontáneos lo cual no concuerda con las observaciones empíricas. Kerner teorizó un modelo de tres fases las cuales son: 1) Flujo libre (F), 2) Flujo sincronizado (S) y amplios atascos en movimiento (J). La transición del flujo libre al congestionado tiene la siguiente secuencia de tráfico  $F \rightarrow S \rightarrow J$  (Kerner, 2002). Para corregir este error en el modelo NaSch, Chmura (Chmura et al., 2014) propuso dos modificaciones: 1) eliminación de la aleatorización de la desaceleración (paso 3 del modelo) y 2) aleatorización de la aceleración, donde la velocidad cambia de acuerdo con la siguiente regla:

$$v_t^i = \begin{cases} v_{t-1}^i + 1, & \text{si } v_{t-1}^i + 1 \leq \mu(v_{t-1}^{i+1}, \delta_{t-1}^i) \text{ y } \xi \leq P_{acc} \\ v_{t-1}^i, & \text{si } v_{t-1}^i + 1 \leq \mu(v_{t-1}^{i+1}, \delta_{t-1}^i) \text{ y } \xi > P_{acc} \\ \mu(v_{t-1}^{i+1}, \delta_{t-1}^i), & \text{de otra manera} \end{cases} \quad 1.1$$

Donde  $\mu(v_{t-1}^{i+1}, \delta_{t-1}^i)$  describe la velocidad máxima de un vehículo  $i$  en el tiempo  $t$ , esta dependerá de la velocidad del vehículo predecesor y la distancia a su predecesor en el tiempo  $t - 1$ . La función  $\mu(v_{t-1}^{i+1}, \delta_{t-1}^i)$  es la siguiente:

$$\mu(v_{t-1}^{i+1}, \delta_{t-1}^i) = \min \left\{ \left\lfloor \frac{1}{2} \sqrt{8\delta_{t-1}^i - 7 + 4v_{t-1}^{i+1}(v_{t-1}^{i+1} - 1)} - \frac{1}{2} \right\rfloor; v_{max} \right\} \quad 1.2$$

Donde  $\lfloor \cdot \rfloor$  es la función piso,  $\delta_t^i$  es la distancia entre el vehículo  $i$  y su predecesor  $i + 1$  en el tiempo  $t$ ,  $v_t^i$  es la velocidad del vehículo  $i$  en el tiempo  $t$ ,  $P_{acc}$  es una constante probabilística de referencia,  $\xi$  es una variable numérica generada aleatoriamente entre  $[0,1]$ ,  $v_{max}$  es la velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo. Cabe mencionar que la función  $\mu(v_{t-1}^{i+1}, \delta_{t-1}^i)$  evita las colisiones al tomar en cuenta la velocidad del vehículo delantero, por tanto, contiene la regla de frenado (paso 2 del modelo NaSch).

### 1.3 Redes Neuronales Artificiales

Las neuronas son células especializadas que te ayudan a obtener información del medio ambiente, a interpretarla y a reaccionar ante ella. Las neuronas conforman una enorme red de comunicación en el cuerpo llamada sistema nervioso. En la Figura 1.3 se muestran las regiones principales de la neurona: dendritas, cuerpo celular y axón. Las dendritas reciben señales llamadas impulsos de otras neuronas y las conducen hacia el cuerpo celular. Cada neurona tiene muchas dendritas. En el cuerpo celular se encuentra el núcleo de la neurona y muchos de los organelos celulares. El axón transporta el impulso nervioso desde el cuerpo celular hasta otras neuronas y músculos.

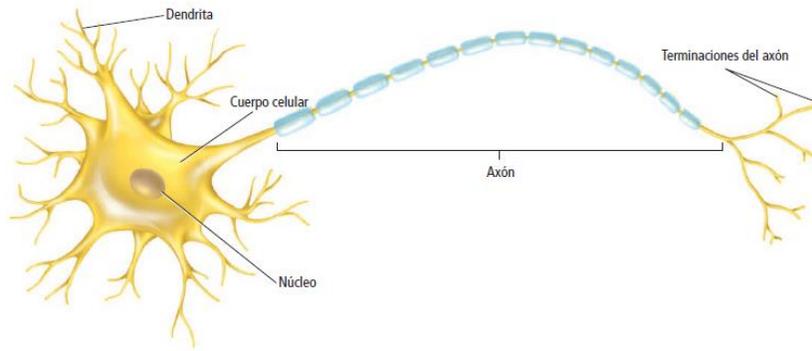


Figura 1.3: Partes principales de una neurona: dendritas, cuerpo celular y axón (Biggs et al., 2011).

### 1.3.1 Neurona simple

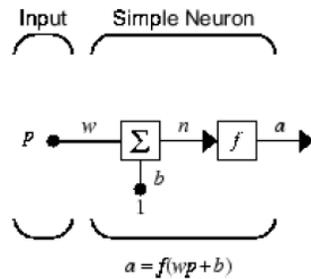


Figura 1.4: Diagrama de una Neurona artificial Simple

La neurona artificial es el elemento primario en una red neuronal artificial, este posee un estado interno, llamado nivel de activación, el cual variará con ayuda de una función llamada función de activación. La función se auxiliará de las señales de entrada que vengan del exterior o de las neuronas a las cuales está conectada (Viñuela y León, 2004). En la neurona artificial, los datos de entrada son representados por el parámetro “P” que al multiplicarse por el parámetro de peso “w”, da como resultado una entrada ponderada  $wp$ . Si a la entrada ponderada se le agrega el parámetro sesgo “b” nos da la entrada neta “n”. Cuando la entrada neta es pasada por una función de activación, nos da como resultado la salida “a”.

### 1.3.2 Neurona con múltiples entradas

La Figura 1.5 muestra un modelo de neurona artificial con múltiples entradas, esta sería una extensión de la neurona simple. Aquí un grupo de entradas  $x_1, x_2, \dots, x_n$  son introducidas en una neurona artificial. Estas entradas, definidas por un vector  $x$ , corresponden a las señales de la sinápsidas de una neurona biológica. Al igual que en la neurona simple, la señal es multiplicada por un peso, con la diferencia que cada señal tiene un peso asociado, esto es:  $w_1, w_2, \dots, w_n$ . Cada peso corresponde a la fuerza de una conexión sináptica, es decir, el nivel de concentración iónica de la sinapsis. El conjunto de pesos se representa por un vector  $w$ .

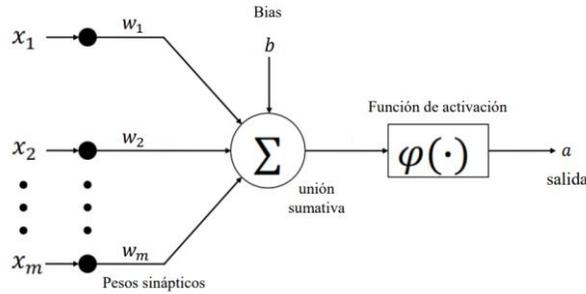


Figura 1.5: Descripción del funcionamiento de una neurona artificial compuesta por m entradas (May, 2020).

En el cuerpo de la neurona se suman todas las entradas ponderadas dando como resultado la entrada E. Al sumarle el sesgo, b, nos da la entrada neta, esto es:

$$E + b = x_1w_1 + x_2w_2 + \dots + x_nw_n + b \quad 1.3$$

Posteriormente la entrada neta es pasada por la función de activación  $\varphi$  con el fin de obtener una señal de salida  $a$  de la neurona artificial:

$$a = \varphi(\mathbf{wx} + b) = \varphi(x_1w_1 + x_2w_2 + \dots + x_nw_n + b) \quad 1.4$$

### 1.3.3 Funciones de activación

La función de activación  $\varphi$  puede ser lineal o no lineal. La selección de la función adecuada se realiza de acuerdo con el tipo de problema y al propio criterio del investigador. Entre las funciones de activación más utilizadas destacan las siguientes funciones (May, 2020):

**Logística sigmoidea:** Esta función de transferencia presenta una rápida convergencia. La función toma los valores de entrada netas y reduce la salida en un rango de 0 a 1.

$$a = \frac{1}{1 + \exp(-n)} \quad 0 \leq a \leq 1 \quad 1.5$$

**Tangente hiperbólica sigmoidea:** Su rango de valores va de -1 a 1. Se emplea cuando la velocidad es más importante que la forma de la función de transferencia.

$$a = \frac{2}{1 + \exp(-2n)} \quad 0 \leq a \leq 1 \quad 1.6$$

**Función lineal:** Por lo general, esta función es utilizada en la salida de la red neuronal. La salida de esta función de transferencia es idéntica al valor de la entrada neta.

$$a = n \quad -\infty \leq a \leq \infty$$

1.7

### 1.3.4 Regla Delta

La regla delta es una regla de aprendizaje, propuesta por widrow y hoff, que toma en cuenta en qué medida resulta errónea la salida producida por la neurona. Se toma la diferencia entre el valor real producido en la capa de salida,  $a_n$ , para un patrón de entrada  $x_n$  y el que debería de haber producido dicho patrón, es decir, la salida esperada  $y_n$ , que está en el conjunto de datos de aprendizaje. La regla, modifica los pesos en dirección opuesta al error cometido, con el objetivo de reducir dicho error y se apoya del cálculo de la derivada de este (gradiente si se trata vectorialmente), cabe mencionar que este proceso se realiza de manera iterativa hasta minimizar el error a la magnitud deseada. La regla delta se puede expresar de la siguiente manera:

$$\Delta w = \eta(y_n - a_n)x_n$$

1.8

Donde  $\eta$  es la tasa de aprendizaje utilizada para controlar el tamaño de los ajustes en cada iteración. Es práctica común utilizar el error cuadrático medio (ECM) para medir el error global. Sin embargo, es posible utilizar otros modelos de cálculo de error.

### 1.3.5 Red Neuronal Artificial

Una Red Neuronal Artificial (RNA) es un modelo matemático inspirado en el comportamiento biológico de las neuronas y en la estructura del cerebro (Viñuela y León, 2004). La mayoría de las aplicaciones en las que se utilizan emplean redes con múltiples neuronas artificiales. Las distintas capas se conectan entre sí de tal forma que la salida de una neurona se utiliza como entrada de la siguiente neurona. Las capas de una RNA multicapa se divide en dos categorías: capas visibles (capa de entrada y de salida) y capas ocultas (todas las capas intermedias diferentes a las capas de entrada y de salida). En la capa de entrada las neuronas reciben los datos, las capas ocultas relacionan los datos con la capa de salida y la capa de salida entrega la respuesta de la red neuronal (Berzal, 2019).

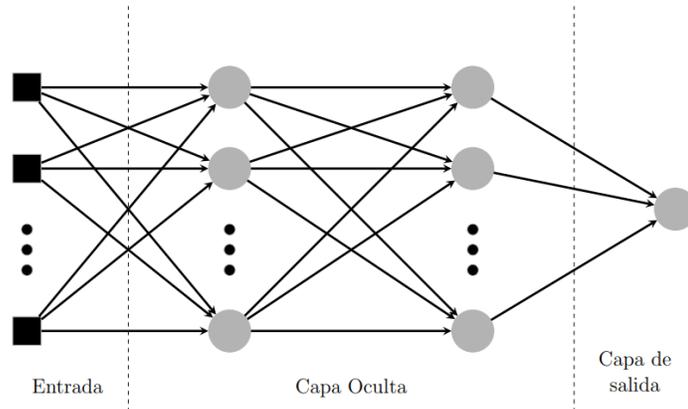


Figura 1.6: Diagrama esquemático de una red neuronal multicapa (May, O., 2020)

### 1.3.6 Retro propagación

Las RNA son sistemas de aprendizaje basados en ejemplos. Los ejemplos que se eligen para el entrenamiento de las RNA deben de ser diversos; es decir, los casos deben de ser variados para evitar la especialización de la red y así poder generalizar y predecir datos. También es necesario un número suficiente de ejemplos con el fin de poder adaptar sus pesos. Durante el proceso de aprendizaje se van introduciendo los ejemplos de entrenamiento y se van modificando los pesos de las conexiones. Ya que se han introducido todos los ejemplos, se evalúa la respuesta de la capa de salida. Si esta ha cumplido cierto criterio de convergencia se termina el entrenamiento, de lo contrario inicia una segunda fase llamada retro propagación. En esta fase, una vez que se ha producido una respuesta, cada neurona de salida distribuye hacia atrás su error a todas las neuronas de la capa oculta inmediata. Estas, a su vez, propagan su error hacia la capa inmediata anterior. Este proceso se repite capa por capa, hasta que se llega a la última capa y se inicia otro ciclo de entrenamiento (Viñuela y León, 2004). La regla de entrenamiento utilizada en redes multicapa se suele denominar regla delta generalizada. Ya que, al terminar la propagación de errores hacia atrás y haber obtenido los gradientes del error, se aplica una regla de actualización de los parámetros de la red similar a la regla delta.

### 1.4 Modelo de consumo de combustible

En 2008, Martin Treiber y colaboradores (M., Treiber, A. Kesting and C. Thiemann, 2008) presentaron un modelo de consumo instantáneo ideal para la simulación del tráfico microscópico, esta combina un modelo físico y los mapas característicos del motor dando una herramienta de estimación para el consumo instantáneo del combustible en función de la velocidad, la aceleración y el motor. El modelo se resume a continuación.

### 1.4.1 Propiedades del vehículo

Las propiedades relevantes que determinan cuanta potencia “P” es necesaria en función de la velocidad  $v$  y la aceleración  $\dot{v}$  del vehículo y los principales factores que influyen son:

- El consumo eléctrico requiere una potencia base “ $P_0$ ”.
- La potencia para vencer la fricción de estado sólido y la resistencia a la rotación de las llantas. Esto puede ser descrito por el coeficiente de fricción  $\mu(v) = \mu_0 + \mu_1 v$ .
- La resistencia aerodinámica la cual conlleva a una fuerza proporcional al cuadrado de la velocidad.
- La potencia necesaria para vencer la fuerza de inercia cuando se acelera o la resistencia a la fuerza gravitacional cuando se conduce en pendiente.

Tomando en cuenta lo anterior, la potencia puede ser modelada de la siguiente manera:

$$\tilde{P}(v, \dot{v}) = P_0 + v[m\{\dot{v} + (\mu_0 + \mu_1 v + \beta)g\} + \frac{1}{2}c_w \rho A v^2] \quad 1.9$$

Donde:

$\tilde{P}$ = Potencia para mover el vehículo.	$\mu_1$ = Coeficiente de fricción.
$P_0$ = Potencia base de consumo energético.	$\beta$ = Pendiente de la carretera.
$v$ = Velocidad del vehículo.	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$ constante gravitacional.
$\dot{v}$ = Aceleración del vehículo.	$c_w$ = Coeficiente aerodinámico.
$m$ = Masa del vehículo.	$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ densidad del aire.
$\mu_0$ = Coeficiente de fricción.	$A$ = Sección de área transversal

La expresión anterior incluye los parámetros de la Tabla 1.1

Tabla 1.1: Resumen de los parámetros de los vehículos.

Parametros	VW passat Synchrono	VW polo diesel
Volumen efectivo del cilindro $C_{cyl}$	1.81	1.41
Consumo básico de potencia $P_0$	3 kW	2 kW
Masa del vehículo $m$	1600 kg	1050 kg
Coeficiente de fricción	0.015	0.015
Coeficiente de fricción	0.0003 s/m	0.0003 s/m
Área de la sección transversal	$2.03 \text{ m}^2$	$1.70 \text{ m}^2$
Coeficiente de fricción del aire	0.32	0.36

Para valores negativos de  $\vec{P}$  correspondientes a la situación de frenado o pendiente abajo, las consecuencias para el consumo de combustible dependerán del manejo del motor y el estilo de manejo.

Se usa el escenario más realista, donde la potencia relevante para el consumo de combustible está dada por:

$$P(v, \dot{v}) = \max(\vec{P}(v, \dot{v}), 0) \quad 1.10$$

## 1.4.2 Modelo de consumo instantáneo de combustible

El consumo instantáneo de combustible puede ser definido como el flujo del combustible consumido por el motor.

$$Q = \frac{dC}{dt} \quad 1.11$$

(Volumen consumido C por unidad de tiempo)

El flujo de combustible Q está en función de la velocidad  $v$ , la aceleración  $\dot{v}$  y el motor G

$$Q = Q(v, \dot{v}, G) \quad 1.12$$

Usando la regla de la cadena, esto puede ser expresado en términos de la distancia,  $C_x$  por:

$$C_x := \frac{dC}{dx} = \frac{\partial C}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{1}{v} \frac{dC}{dt} = \frac{Q}{v} \quad 1.13$$

Esta cantidad puede darse en términos de litros por kilómetros o galones por millas. En este sentido se puede calcular el consumo por cada 100 km, cuando se conduce el tramo completo, usando la siguiente expresión:

$$C_{100} = 100 \text{ km} \times \frac{Q}{v} \quad 1.14$$

Treiber (M., Treiber, et al., 2008) menciona que el flujo puede ser expresado en término de la eficiencia y la potencia mecánica de la siguiente manera:

$$Q(P, pe, f) = \frac{P}{\gamma \times w_{cal}} \quad 1.15$$

Donde:

$\gamma$  = Eficiencia energética del combustible

$w_{cal}$  = Densidad energética del combustible

Tomando en cuenta la expresión del flujo en términos de eficiencia y potencia mecánica y sustituyéndola en la expresión del consumo por cada 100km, tenemos que:

$$C_{100} = \frac{100000m}{\gamma_{\epsilon} \times w_{cal}} \times \frac{P}{v} \quad 1.16$$

Donde, para un vehículo y motor dado, esta expresión dependerá de la velocidad.

## 1.5 Modelo de emisiones

En 2006 Panis desarrolló un modelo de emisiones instantáneas para el tráfico, este es capaz de predecir las emisiones de óxido nitroso (NO<sub>x</sub>), componentes orgánicos volátiles (VOC), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y partículas de suspensión (PM). Se utilizaron mediciones de 25 tipos de vehículos de entre ellos 6 autobuses y dos camionetas. De igual manera se toman en cuenta motores diésel y a gasolina. Como resultado se obtuvo una función de emisión la cual usa como parámetros la velocidad y aceleración instantánea: La función general de emisiones es la siguiente:

$$E_n(t) = \max[E_0, f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n(t)^2 + f_4 a_n(t) + f_5 a_n(t)^2 + f_6 v_n(t) a_n(t)] \quad 1.17$$

$v_n(t)$  y  $a_n(t)$  son la velocidad y la aceleración instantáneas del n-ésimo vehículo calculado en el tiempo t.  $E_0$  es la emisión mínima específica para cada vehículo y contaminante.  $f_1 \dots f_6$  son constantes de emisión específicas para cada vehículo y contaminante determinadas por un análisis de regresión. Para ciertos contaminantes se han derivado diferentes formas funciones para la aceleración ( $a_n(t) \geq -0.5 \text{ m/s}^2$ ) y deceleración ( $a_n(t) < -0.5 \text{ m/s}^2$ )

## 2 Metodología

Este trabajo se dividió en tres fases. La primera fase consistió en el desarrollo de un AC usando el modelo NaSchM. Se verificó que su evolución en un arreglo unidimensional (“*array*” o vector) fuese el adecuado. Posteriormente se procedió a implementar el AC en una intersección a través de un compendio de reglas que dependen del tipo de estrategia implementada. Ya que el sistema con los dos tipos de estrategia funcionó adecuadamente se implementaron los modelos de consumo energético y emisiones de gases de escape.

En la segunda fase se generó una base de datos. Esta contiene 7,776 elementos. Se buscó que la base de datos fuese lo suficientemente extensa. Esto con el fin de darle a la RNA bastantes ejemplos para poder generalizar el problema de manera adecuada. Una buena generalización tendría como recompensa buenas predicciones de parte de la RNA.

Por último, se entrenaron las RNAs con la base de datos generada. Se optó por entrenar una RNA por cada salida deseada, es decir, se buscó obtener flujo, emisión y consumo energético para la vialidad 1 y vialidad 2. En total se entrenaron tres arquitecturas de RNA’s para cada estrategia de cruce.

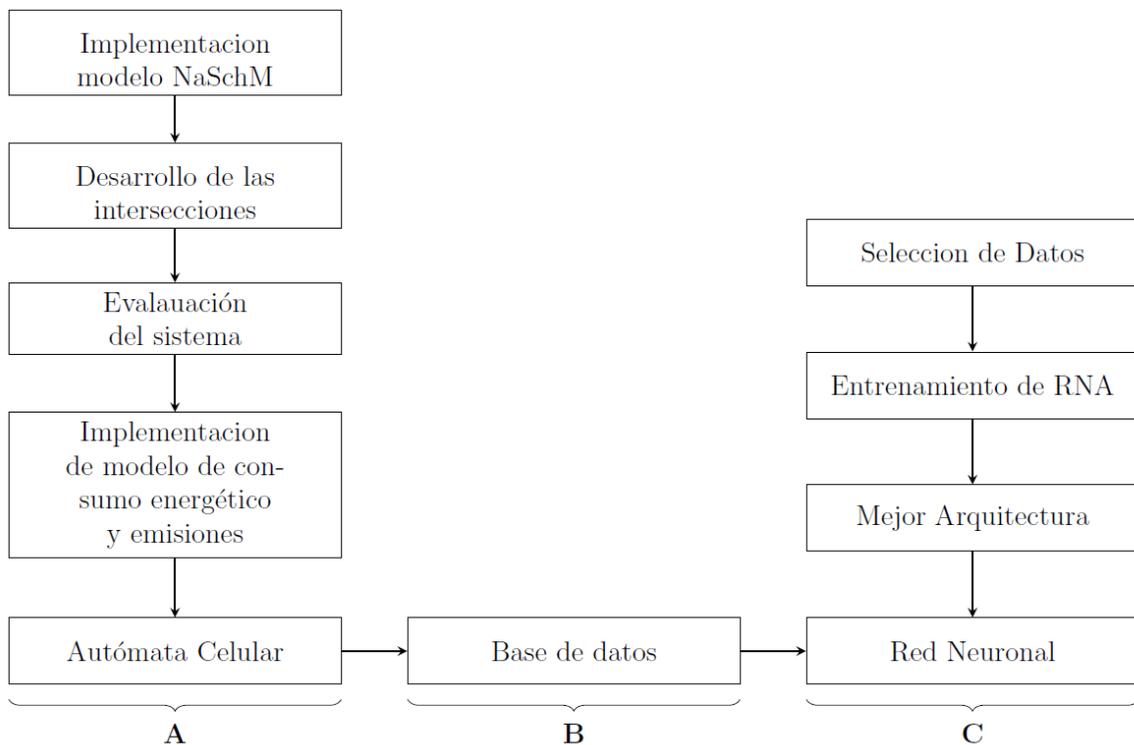


Figura 2.1: Diagrama de flujo metodología de entrenamiento RNA

## 2.1 Autómata celular NaSchM con medición de consumo y de emisiones de escape

Se implementó el autómata celular de Chmura (Chmura et al., 2014) para simular el tráfico en un sistema de intersección de dos vialidades. Ya que se obtuvo un buen comportamiento del autómata celular se procedió a implementar los modelos de emisión y de consumo. En la figura 4 se muestra el diagrama del flujo del programa realizado.

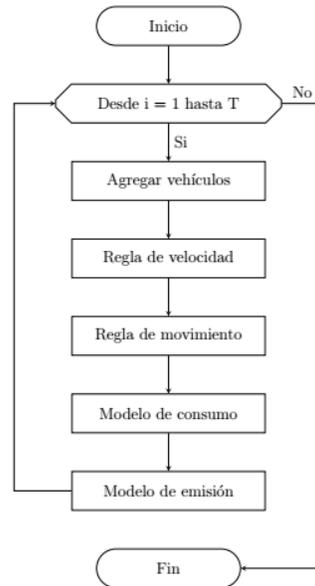


Figura 2.2: Diagrama de flujo del modelo NaSchM más el modelo de consumo y el modelo de emisión.

En el diagrama de flujo se puede observar la sucesión de pasos que conlleva la simulación del tráfico. Primeramente, se agregan vehículos a la vialidad, posteriormente se aplican las reglas de evolución del AC NaSchM y por último se aplican los modelos de medición de consumo y emisión.

## 2.2 Intersección

Para las dos vialidades se han implementado las condiciones de frontera Barlovic (Barlovic, R., et al., 2002) donde se tienen condiciones de frontera abierta y el sistema principal se ha ampliado con un mini sistema. El flujo de inyección y de salida de los vehículos está controlada por dos variables estocásticas ( $\alpha$  y  $\beta$ ). Los vehículos salen de la vialidad con una probabilidad  $\beta$  si, al actualizarse su posición, esta es mayor a la longitud de la vialidad. El mini sistema es una ampliación del sistema principal, este se ubica a un lado de la entrada de la vialidad. El mini sistema tendrá una longitud  $D_{max} = (V_{max} + 1) * iteración$ . El minisistema debe de actualizarse antes que el sistema principal. Si una de las celdas del minisistema está ocupada, debe de vaciarse. Posteriormente se inserta un vehículo a una distancia  $D_{max}$  del primer coche del sistema principal. Por último, el vehículo del mini sistema ingresa al sistema principal con una probabilidad  $\alpha$ . Las reglas de paso en la intersección dependerán del tipo de estrategia utilizada en este punto. Se han implementado dos estrategias: intersección con prioridad e intersección con semáforo.

### 2.3 Intersección con prioridad

En la vialidad con regla de prioridad se define  $d_1$  como la distancia que hay entre la intersección y la posición del vehículo en la vialidad 1, la misma lógica se utiliza para  $d_2$ . Existen dos casos a considerarse. El primer caso (Figura 2.3) es cuando se le da prioridad al vehículo más cercano a la intersección. En la Figura 2 se tienen un vehículo rojo con distancia  $d_1$  menor a la distancia  $d_2$  del vehículo verde ( $d_1 < d_2$ ) en este caso se le dará prioridad para cruzar al vehículo rojo.

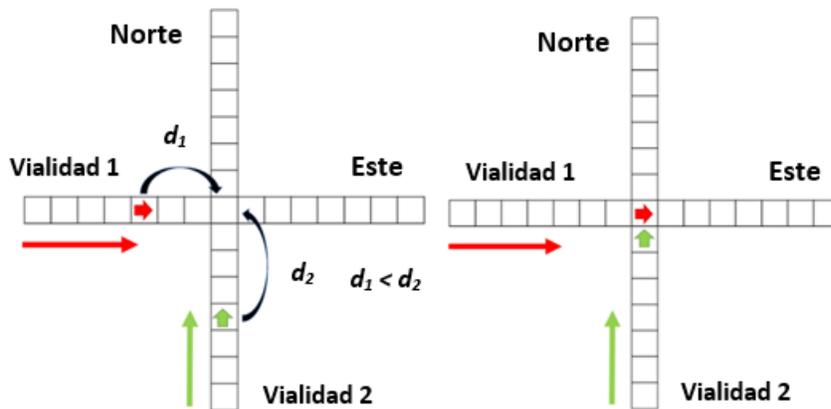


Figura 2.3: Intersección con prioridad; En esta figura se muestra el caso cuando no hay un conflicto entre vehículos.

El segundo caso se ilustra en la Figura 2.4. Cuando el vehículo rojo tiene una  $d_1$  igual a  $d_2$  ( $d_1 = d_2$ ) y ambos vehículos tienen la velocidad suficiente para llegar a la intersección. Se dará la prioridad  $P$  a los vehículos de la vialidad 1 y la prioridad  $1 - P$  a los vehículos de la vialidad 2 donde  $P \in [0,1]$ .

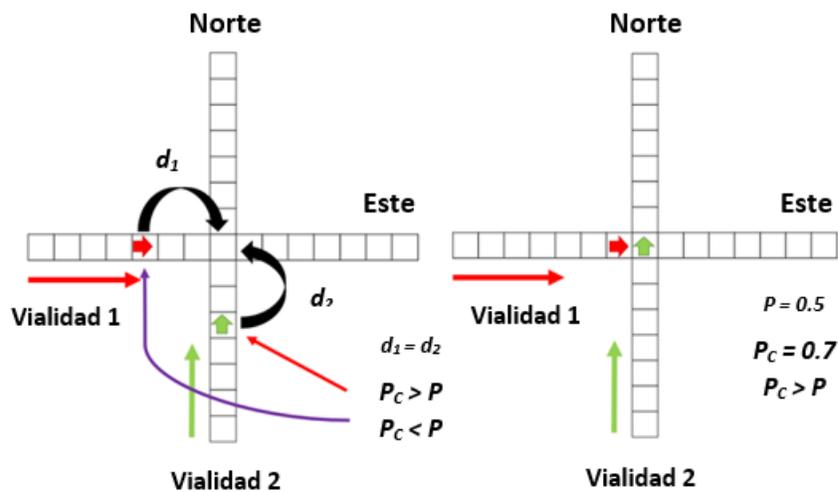


Figura 2.4: intersección con prioridad, segundo caso; El sistema resuelve que vehículo cruzara la intersección cuando s tiene un conflicto en la intersección.

## 2.4 Intersección con semáforos

La intersección con semáforos Figura 2.5 cuenta con un periodo de tiempo global  $T_G$ , una parte del periodo global, el semáforo estará en verde y el otra en rojo. El periodo de tiempo que uno de los semáforos esté en verde/rojo será influenciada por el semáforo de la otra vialidad. La proporción de tiempo que el semáforo va a estar en verde en la vialidad 1 se llamará  $T_P$  este será un numero entre 0 y 1. Es decir, el tiempo en verde de la vialidad 1 será

$$T_1 = T_G * T_P$$

Y el periodo de tiempo en verde del semáforo en la vialidad 2 será:

$$T_2 = T_G - T_1$$

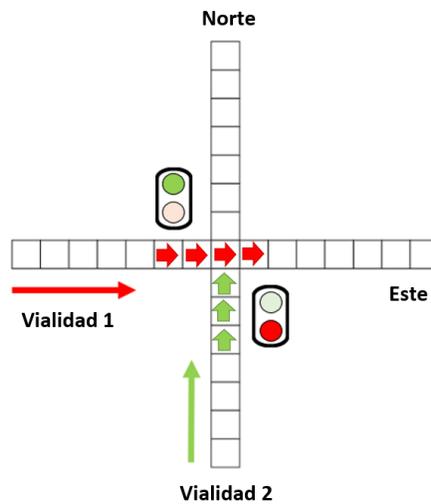


Figura 2.5: Intersección con semáforos; se puede observar la dinámica de cruce de los vehículos a través de la intersección, donde solo cruzarán lo vehículos de la vialidad con semáforo en luz verde.

## 2.5 Generación de la base de datos

Para entrenar las RNA se han elegido los parámetros: probabilidad de entrada en la vialidad 1, probabilidad de entrada en la vialidad 2, probabilidad de salida en la vialidad 1, probabilidad de salida en la vialidad 2, probabilidad de cruce; para la intersección con regla de prioridad, y proporción de tiempo que el semáforo va a estar en verde en la vialidad 1. La base de datos fue generada usando el AC NaSchM.

Se han generado dos bases de datos; una de la intersección con semáforo y otra de la intersección con prioridad de cruce. Para la intersección con semáforo se ha generado una base de datos con 161,051 elementos donde el número de datos está dado por la siguiente permutación:

$T_P$	$\beta_1$	$\alpha_1$	$\beta_2$	$\alpha_2$
0:1	0:1	0:1	0:1	0:1

Donde los valores de  $T_P, \beta_1, \alpha_1, \beta_2, \alpha_2$ , van de cero a uno a pasos de 0.1. Como resultado una permutación de los valores antes mencionados se obtiene el promedio de  $J_1, J_2, E_1, E_2, C_1$  y  $C_2$ . Una metodología similar se ha utilizado para la generación de la base de datos de la intersección con prioridad, donde la permutación de valores es de la siguiente forma

$P$	$\beta_1$	$\alpha_1$	$\beta_2$	$\alpha_2$
0:1	0:1	0:1	0:1	0:1

Con  $T_P, \beta_1, \alpha_1, \beta_2, \alpha_2 \in [0,1]$  a pasos de 0.1. Igual se han obtenido los valores promedio de  $J_1, J_2, E_1, E_2, C_1, C_2$ . A continuación, se muestra un diagrama de flujo donde se muestra el procedimiento mediante el cual se generó la base de datos.

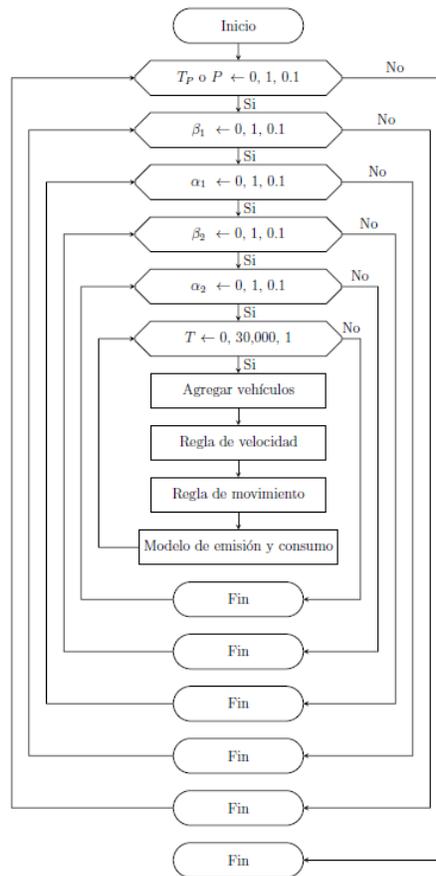


Figura 2.6: Diagrama de flujo del Autómata Celular.

En la Figura 2.6 se muestra el diagrama de flujo del autómata celular. Este consta de 6 bucles anidados. El bucle más interno corresponde a las iteraciones durante las cuales evolucionará el autómata celular. El autómata evolucionará con parámetros dados de probabilidad de cruce o tiempo de luz verde y de probabilidad de entrada y salida para vialidad 1 y 2. Cada vez que un bucle cumpla con la condición de haber llegado a su valor máximo. Incrementará el valor del bucle externo al que se encuentra anidado. Esto es, para el bucle de iteraciones de evolución, si  $T > 30,000$  entonces  $T$  se reiniciará a  $T = 0$  e hará que el valor de  $\alpha_2$  incremente, según sea el valor asignado. El valor que el parámetro  $\alpha_2$  podrá adquirir solo serán valores 0 y 1 y valores intermedios de estos. Lo mismo para  $\alpha_1, \beta_2, \beta_1, T_p$  y  $P$ . Cuando  $\alpha_2$  alcance un valor mayor a 1 ( $\alpha_2 > 1$ )  $\alpha_2$  se reiniciará a cero y hará que  $\alpha_1$  incremente su valor. De igual manera si  $\beta_2$  alcanza un valor mayor a 1, su valor será reiniciado a cero e incrementará el valor de  $\alpha_1$ . Y así sucesivamente para  $\beta_1$  y  $T_p$  o  $P$  según sea el caso. Cabe mencionar que cuando  $T_p$  o  $P$  alcance un valor mayor a 1 se dará por terminado el programa.

## 2.6 Arquitectura de la Red Neuronal Artificial

En este trabajo, se entrenaron seis redes neuronales de tres capas: i) capa de entrada con 5 variables: probabilidad de entrada 1, probabilidad de entrada 2, probabilidad de salida 1, probabilidad de salida 2 y probabilidad de cruce (estrategia: intersección con prioridad de cruce) ó proporción de tiempo en verde para la vialidad 1 (estrategia: intersección con semáforo); ii) capa oculta, esta contiene neuronas de conexión; y iii) capa de salida conformada por dos variables de salida: 1) flujo vehicular en vialidad 1 y flujo vehicular en vialidad 2; 2) Emisiones de CO<sub>2</sub> en vialidad 1 y Emisiones de CO<sub>2</sub> en vialidad 2; y 3) Consumo energético en vialidad 1 y consumo energético en vialidad 2. Tanto para la estrategia de intersección con prioridad de cruce como para la estrategia de intersección con semáforos.

En la Figura 2.7 se muestra la topología de la RNA entrenada donde  $x_1$  a  $x_5$  son las variables de entrada,  $a_1$  a  $a_{10}$  son las neuronas de la capa oculta y  $y_1$  e  $y_2$  son los valores de salida. A pesar de que las RNAs no son un concepto nuevo, no existe un método analítico para calcular el número de neuronas y de capas idóneo para un problema en específico (Stathakis, 2009). El método ampliamente usado es el de prueba y error. Es decir, ir probando el rendimiento de diferentes topologías hasta encontrar un óptimo.

Siguiendo el desarrollo de la sección 1.3, se puede obtener la expresión general para una salida de la RNA, esta es:

$$y_n = g(W_0 \cdot f(W_1 \cdot X + b_1) + b_0) \quad 2.1$$

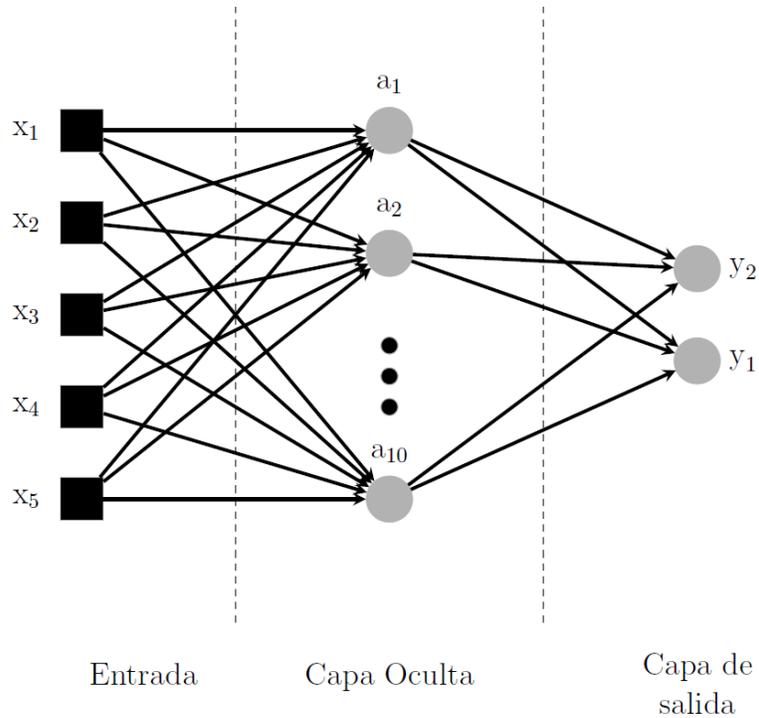


Figura 2.7: Arquitectura de Red Neuronal Artificial general.

Donde  $f$  y  $g$  son las funciones de activación de cada capa,  $b_0$  y  $b_1$  es el “bias” o sesgo,  $W_0$  y  $W_1$  son las matrices de pesos de cada capa y  $X$  es el vector de entradas de la RNA. Las funciones de activación para capa oculta y la capa de salida fueron la función tangente hiperbólica y función lineal, respectivamente. Aplicando estas funciones, la ecuación 2.1 puede ser escrita como:

$$y_n = \sum_{i=1}^{10} \left[ W_0(n, i) \cdot \left( \frac{2}{1 + \exp(-2 \cdot (\sum_{k=1}^5 (w_1(i, k) \cdot X(k) + b_1(i))))} - 1 \right) + b_2(n) \right] \quad 2.2$$

Donde  $k$  es el número de variables de entrada,  $i$  es el número de neuronas en la capa oculta e  $i$  es el número de variables de salida.

### 3 Resultados y descripción

Se ha realizado la simulación de una intersección. El sistema de intersección está conformado de dos vialidades de longitud  $L$  perpendiculares entre sí. La longitud de cada vialidad es de  $L_1 = L_2 = 100$  celdas (500 m). La intersección se encuentra ubicada en la celda 50 de cada vialidad. Cada celda es igual a 5 m. La longitud de cada vehículo es de una celda. La velocidad máxima que cada vehículo puede alcanzar es de 3 celdas/iteración y  $P_{acc} = 0.5$ . Cada vialidad tiene su propio valor de probabilidad de entrada y probabilidad de salida, para cada simulación se ha dejado evolucionar el sistema durante 30,000 iteraciones, de las cuales solo durante las últimas 10,000 iteraciones se registraron datos.

#### 3.1 Autómata Celular: Intersección con regla de prioridad

En la Figura 3.1 se pueden observar los gráficos de flujo vs  $\alpha_1$  y de  $\text{CO}_2$  vs  $\alpha_1$ . Para la  $R_1$  el flujo inicia en cero cuando  $\alpha_1 = 0$ , lo opuesto sucede en la  $R_2$  donde el flujo es máximo cuando  $\alpha_2 = 1$ . El flujo incrementa en  $R_1$  cuando  $\alpha_1 > 0$ , pero cuando  $\alpha_1 = 0.3$  se detiene el incremento de flujo y se trunca en una meseta. Mientras que el flujo incrementa en  $R_1$ , el flujo en  $R_2$  decrece. Lo mismo ocurre en la Figura 3.1b y Figura 3.1c. La diferencia entre la Figura 3.1a, b y c es la distancia entre la meseta de flujo vehicular en  $R_1$  y  $R_2$ . Se puede observar que hay una distancia máxima, cuando  $P = 1$ , esta decrece mientras que  $P$  decrece. Cuando  $P = 0.5$  las mesetas adquieren valores similares. El mismo fenómeno ocurre para los gráficos de emisión Figura 3.1d-f. Cuando  $P = 0.5$ , las mesetas de la emisión de  $\text{CO}_2$  son similares, pero cuando incrementa  $P$  también lo hace la diferencia entre estas, lo mismo ocurre para el consumo energético.

La Figura 3.2 es el diagrama de espacio tiempo para  $R_1$  (Figura 3.2a) y  $R_2$  (Figura 3.2b) cuando  $\alpha_1 = 0.1$  en la Figura 3.1a. Se puede observar que pocos vehículos van entrando a  $R_1$ , por tanto, existe una baja densidad de vehículos. Los vehículos en  $R_1$  tienen mayor preferencia de pasar a través de la intersección. Por ende, pocos vehículos tienen que esperar su turno para cruzar. Esto se debe a que a veces los vehículos de  $R_2$  están en la intersección cuando los de  $R_1$  intentan cruzar (recuerde las reglas de la sección 2.3). La fase de flujo libre domina el diagrama. La Figura 3.2b muestra que existe un mayor flujo de vehículos en  $R_2$  que en  $R_1$ . También se observa una mayor densidad de vehículos. En algunos puntos antes de la intersección hay vehículos que deben esperar su turno para cruzar a través de la intersección, esto provoca agrupaciones de vehículos que se extienden desde la intersección hasta la entrada de  $R_2$ . Estos grupos de vehículos se disipan a medida que los vehículos tienen la oportunidad de cruzar la intersección. Cuando no se forman grupos de vehículos, los vehículos se mueven uno detrás de otro, por lo que en algunos puntos existe una fase de atasco amplio y en otros una fase de flujo sincronizado. El flujo libre en  $R_1$  puede explicar por qué las emisiones de  $\text{CO}_2$  en la Figura 3.1d y el consumo en la Figura 3.1g son algo similares a las de  $R_2$ . Debido a que en  $R_1$  hay más vehículos que pueden alcanzar su máxima velocidad que en  $R_2$ , donde existen atascos y los vehículos se mueven a baja velocidad.

La Figura 3.3 es el diagrama de espacio tiempo de  $R_1$  (Figura 3.3a) y  $R_2$  (Figura 3.3b) cuando  $\alpha_1 = 0.6$  en la Figura 3.1a. Se observa un mayor flujo de vehículos en  $R_1$  que el observado en la Figura 3.2a. Aquí existe una combinación de grupos de vehículos, fase de atascos amplios y fase de flujo sincronizado antes de la intersección. Pero después de la intersección existe una fase de flujo libre.

En  $R_2$ , antes de la intersección dominan los atascos desde la entrada a  $R_2$  hasta la intersección. Esto explica la brecha entre la emisión en la Figura 3.1d y los consumo en la Figura 3.1g. Debido a que, a menos vehículos están parados antes de la intersección y más vehículos se mueven a la velocidad máxima antes de la intersección en  $R_1$  que en  $R_2$ . Así que, como se puede ver en las ecuaciones 1.16 y 1.17, la velocidad y la aceleración tienen un peso importante en el consumo y las emisiones de  $\text{CO}_2$ .

La Figura 3.4 es el diagrama de espacio tiempo para  $R_1$  (Figura 3.4a) y  $R_2$  (Figura 3.4b) cuando  $\alpha_1 = 0.6$  en la Figura 3.1c. En cada carretera existen agrupaciones de vehículos y una fase de atascos amplios antes de la intersección. Después existe la fase de flujo libre. Esto explica el patrón similar en la emisión de  $\text{CO}_2$  en la Figura 3.1f en la meseta y del consumo en la Figura 3.1i.

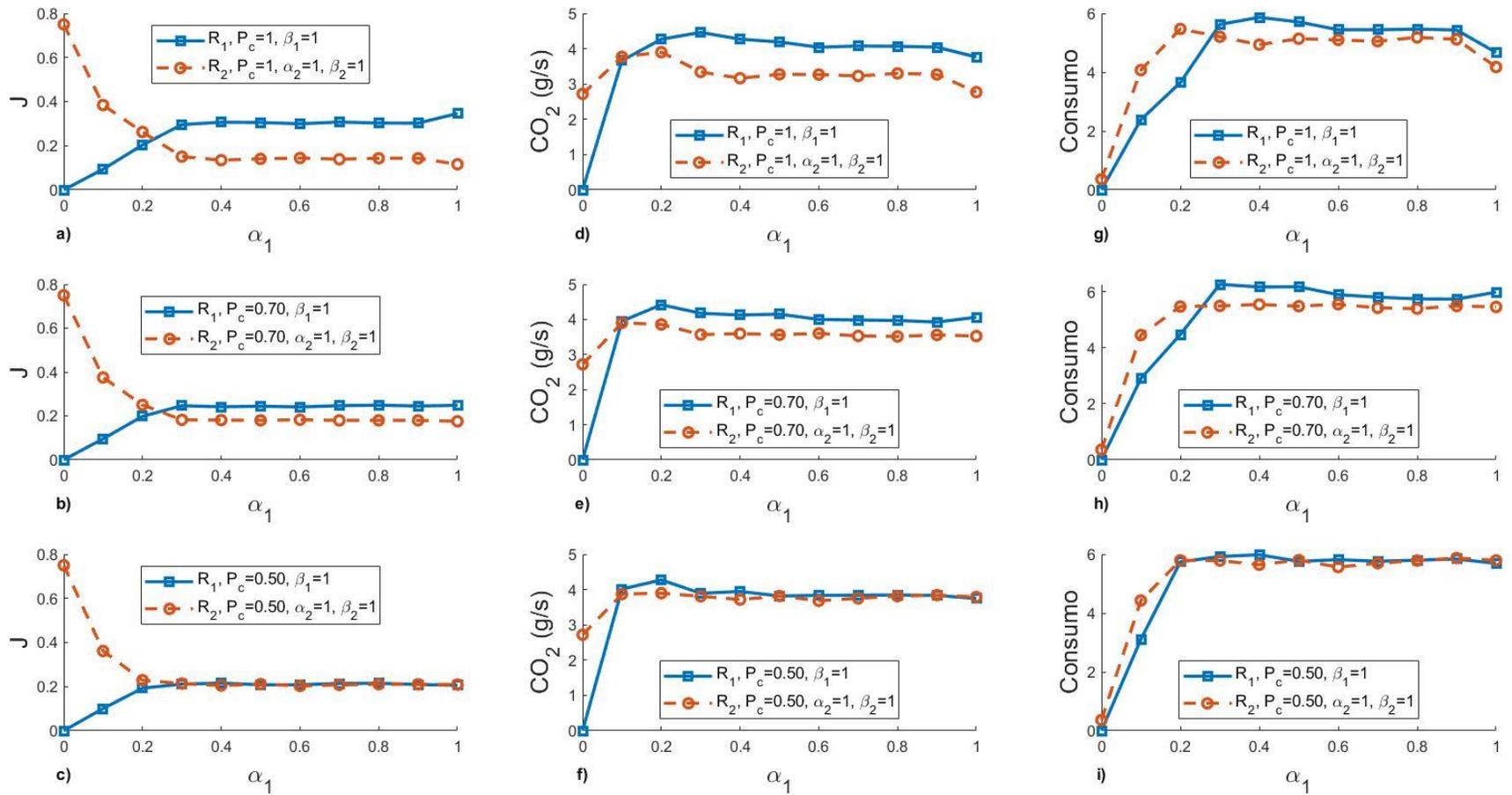


Figura 3.1: Curvas de flujo y emisi3n vs probabilidad de entrada de la validad 1 para la estrategia de intersecci3n con prioridad de cruce.

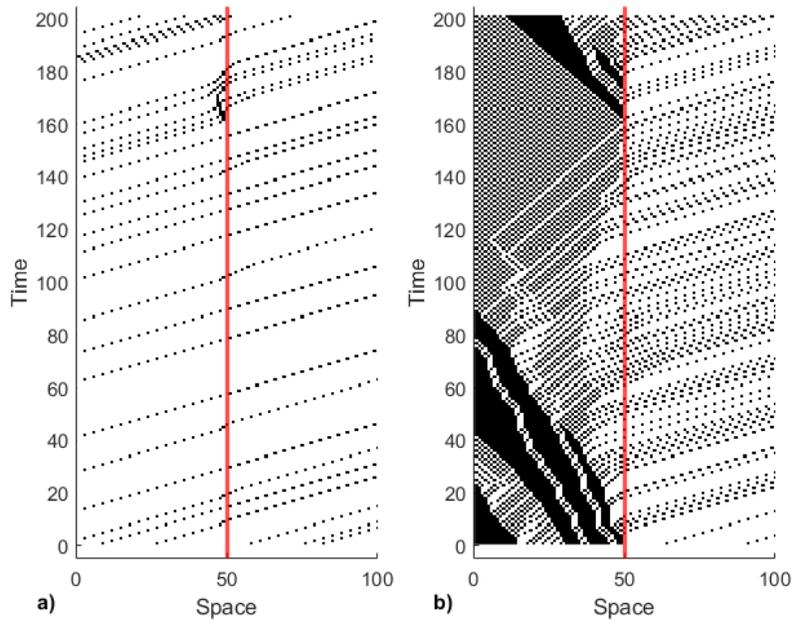


Figura 3.2: Diagrama de espacio tiempo para  $\alpha_1 = 0.1$ ,  $\alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$  y  $P_c = 1$

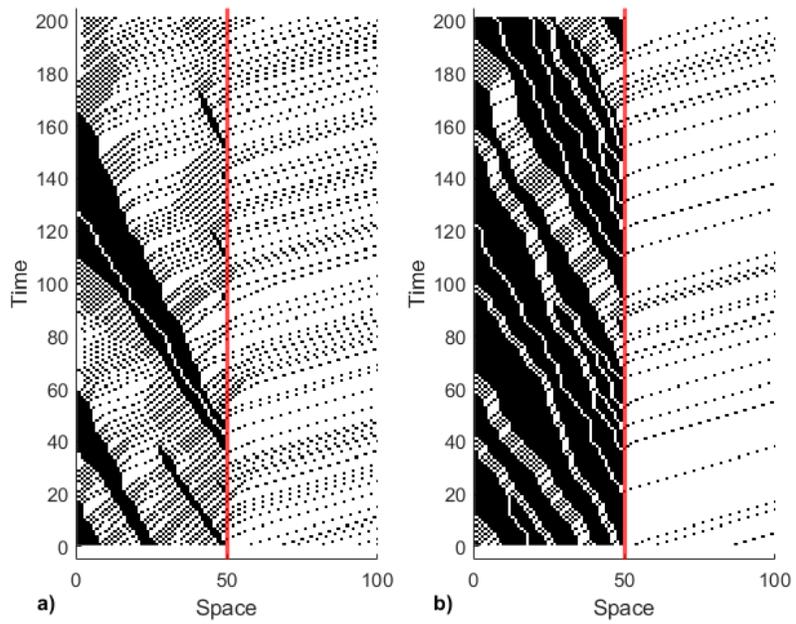


Figura 3.3: Diagrama de espacio tiempo para  $\alpha_1 = 0.6$ ,  $\alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$  y  $P_c = 1$

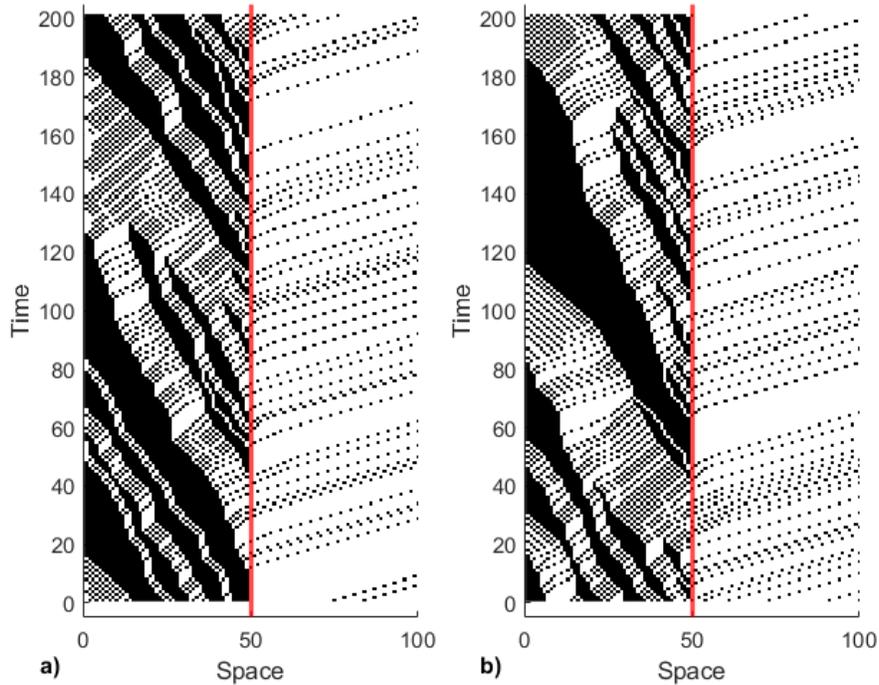


Figura 3.4: Diagrama de espacio tiempo para  $\alpha_1 = 0.6$ ,  $\alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$  y  $P_c = 0.5$

### 3.2 Autómata Celular: Intersección con semáforo

La Figura 3.5 muestra el flujo de vehículos en  $R_1$  y  $R_2$  cuando la estrategia de cruce es un semáforo. La Figura 3.5a muestra que el flujo de vehículos para  $R_2$  es constante incluso si  $\alpha_1$  aumenta. Esto se repite incluso si  $T_p$  cambia (Figura 3.5b y c). El flujo de vehículos en  $R_2$  cuando  $T_p = 0.3$  es mayor que el flujo de vehículos en  $R_2$  cuando  $T_p = 0.7$ . Lo contrario ocurre en  $R_1$ , donde el flujo de vehículos es mayor en  $T_p = 0.7$  que en  $T_p = 0.3$ . Cuando  $T_p = 0.5$  el flujo de vehículos es similar en  $R_1$  y  $R_2$  con  $\alpha_1 \geq 0.2$ . Para  $R_1$  se extiende una pendiente mientras que  $T_p \geq 0.3$ , esta pendiente alcanza una meseta donde el flujo de vehículos se mantiene constante. Los diagramas de  $CO_2$  (Figura 3.5d-f) y de consumo energético (Figura 3.5g-i) siguen la misma tendencia que los diagramas de flujo vehicular.

La Figura 3.6 es el diagrama espacio tiempo para  $R_1$  (Figura 3.6a) y  $R_2$  (Figura 3.6b) cuando  $\alpha_1 = 0.6$  en la Figura 3.5a. Aquí se puede observar el periodo verde/rojo para  $R_1/R_2$ . Esto se denota por la corriente de puntos negros seguidos de un espacio blanco. El espacio blanco/negro después de la intersección es cuando el semáforo está en rojo/verde. Para  $R_1$  el tiempo de cruce es de 21 iteraciones y para  $R_2$  es de 9 iteraciones. En  $R_1$  la densidad de vehículos es menor que en  $R_2$ . Los vehículos pueden moverse libremente e incluso pueden entrar en la carretera más a menudo que en  $R_2$ . Por lo tanto, las emisiones de  $CO_2$  así como el consumo energético en  $R_1$  son mayores que en  $R_2$ .

Para  $R_1$  y  $R_2$  el tiempo de cruce es de 15 iteraciones cada uno en la Figura 3.7. Tener el mismo tiempo de cruce hace que el flujo de vehículos para  $R_1$  y  $R_2$  sea muy similar como se puede ver en la Figura 3.5b. En esta situación los vehículos de cada carretera tienen un comportamiento similar en cuanto a

velocidad y aceleración. Por lo tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo son muy similares en cada carretera como muestra la Figura 3.5e y h.

En contraste con la Figura 3.6, la Figura 3.8 presenta una mayor densidad de vehículos en R<sub>2</sub> que en R<sub>1</sub> antes de la intersección. Aquí el tiempo de cruce es, para R<sub>2</sub>, de 21 iteraciones y, para R<sub>1</sub>, de 9 iteraciones. El mayor flujo de vehículos y las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> se dan en R<sub>2</sub>.

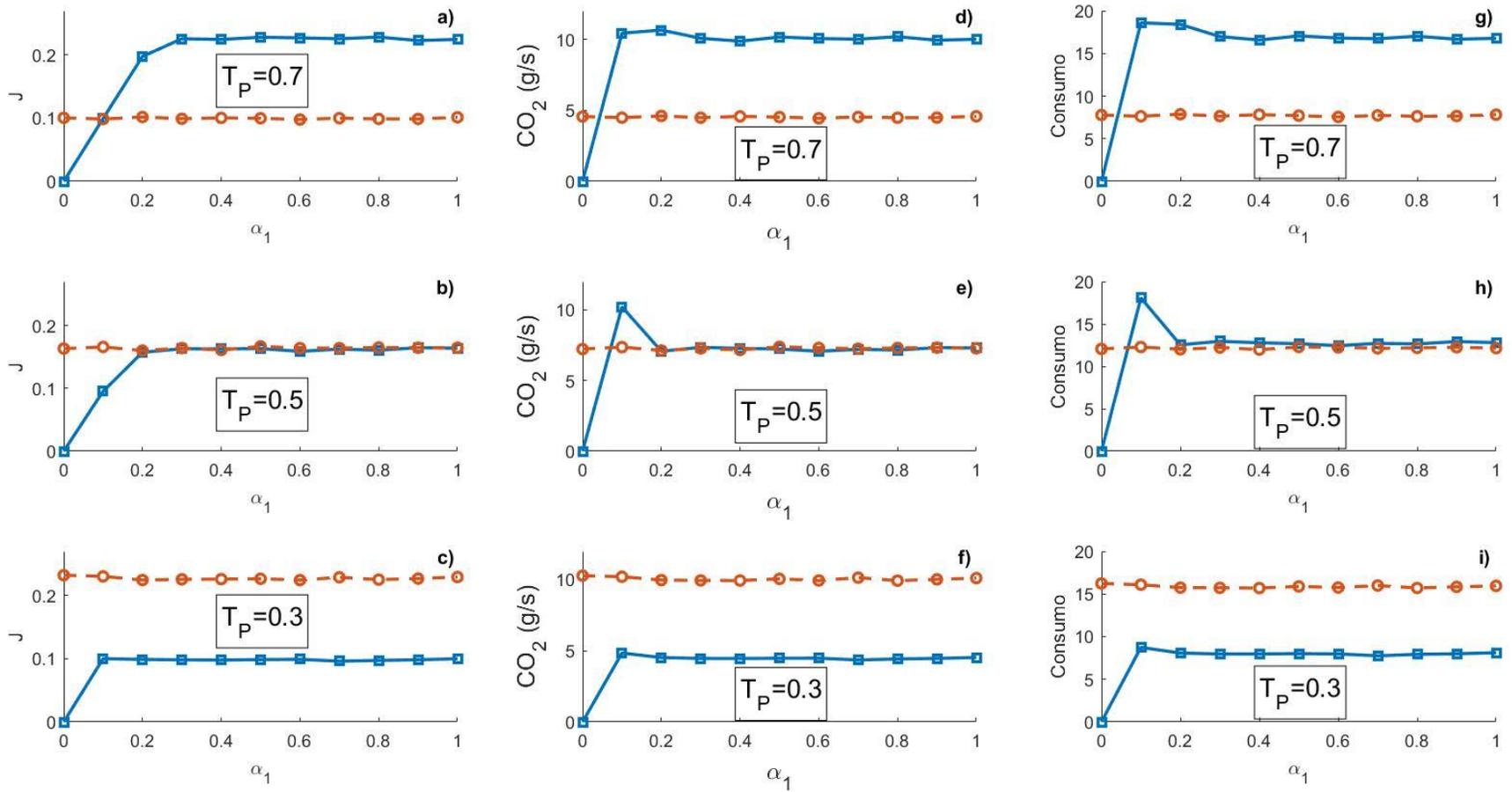


Figura 3.5: Curvas de flujo y emisión vs probabilidad de entrada de la vialidad 1 para la estrategia de intersección con semáforo.

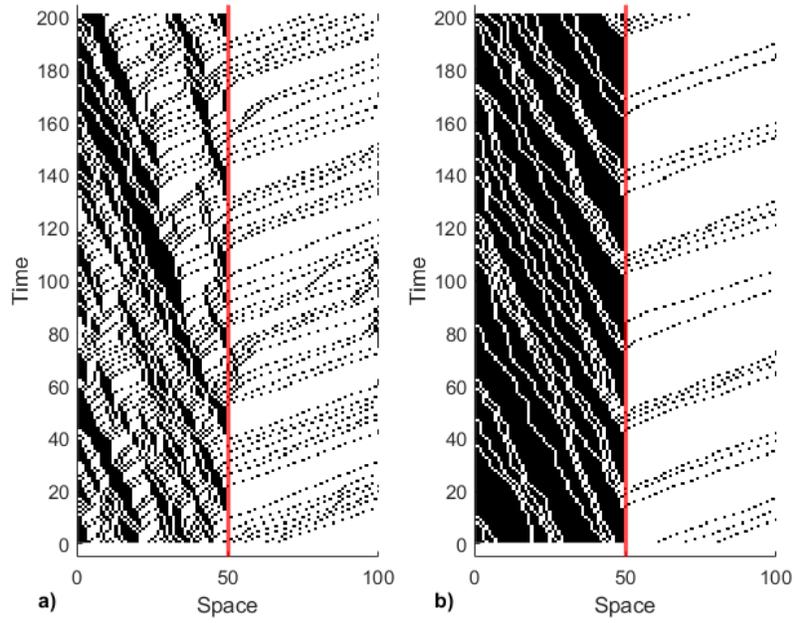


Figura 3.6: Diagrama de espacio tiempo para  $\alpha_1 = 0.6$ ,  $\alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$  y  $P_c = 0.7$

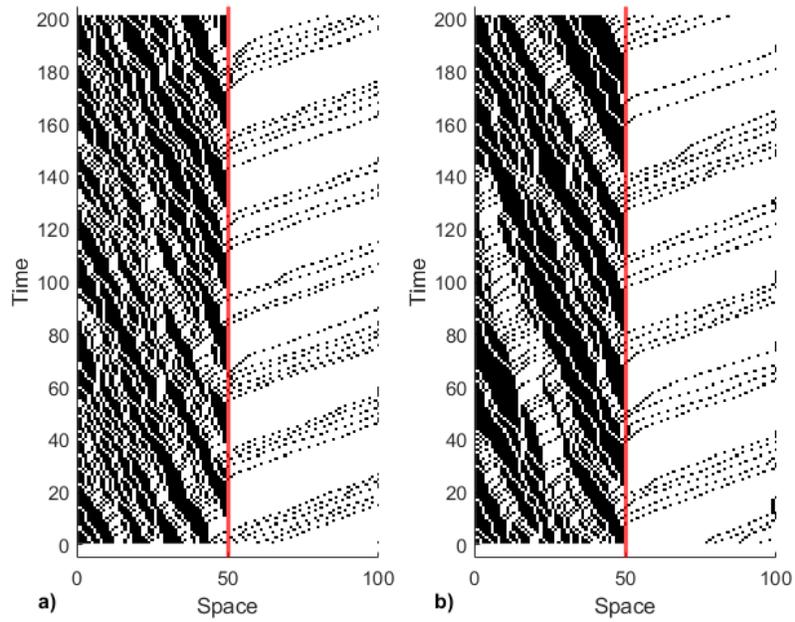


Figura 3.7: Diagrama de espacio tiempo para  $\alpha_1 = 0.6$ ,  $\alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$  y  $P_c = 0.5$

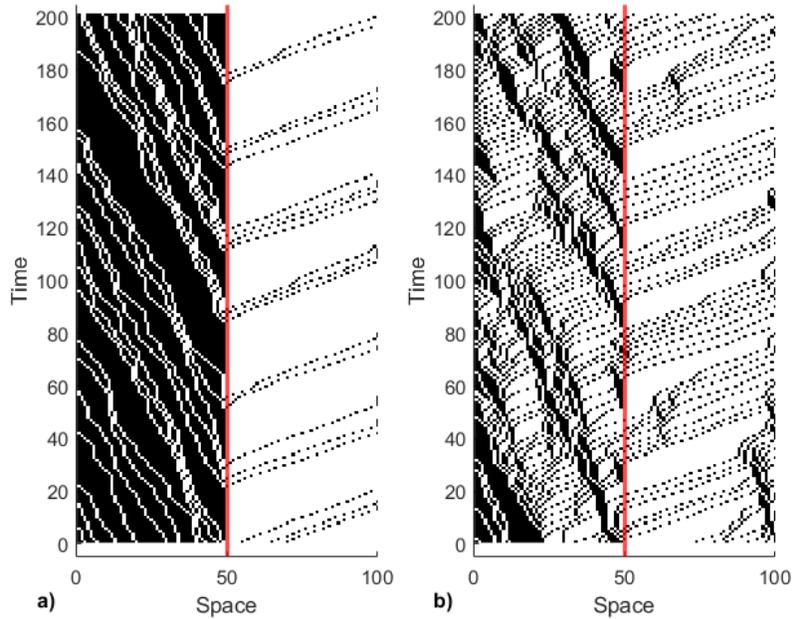


Figura 3.8: Diagrama de espacio tiempo para  $\alpha_1 = 0.6$ ,  $\alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 1$  y  $P_c = 0.3$

### 3.3 Comparativo

En la Tabla 3.1 se resumen los valores de flujo, emisión y consumo para diferentes valores de  $P$ . Se promediaron los valores de varias simulaciones. Similar para la Tabla 3.2, en esta tabla se han variado los valores de  $T_p$ . De las tablas se puede observar que el flujo es mayor en la estrategia de intersección con prioridad de cruce. También se puede observar que las emisiones y el consumo son mayores en la estrategia de la intersección con semáforo.

Tabla 3.1: Resumen de valores promedio para la estrategia de intersección con prioridad de cruce

P	Flujo Promedio		Emision Promedio		Consumo Promedio	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2
<b>0.1</b>	0.134	0.336	3.16	3.96	4.656	5.126
<b>0.2</b>	0.142	0.319	3.24	3.934	4.768	5.227
<b>0.3</b>	0.156	0.303	3.346	3.872	4.902	5.256
<b>0.4</b>	0.167	0.288	3.455	3.781	5.017	5.2
<b>0.5</b>	0.18	0.273	3.549	3.7	5.038	5.138
<b>0.6</b>	0.194	0.263	3.646	3.6	5.054	5.001
<b>0.7</b>	0.205	0.256	3.705	3.539	5.013	4.92
<b>0.8</b>	0.219	0.244	3.784	3.441	5.014	4.791
<b>0.9</b>	0.231	0.238	3.762	3.376	4.81	4.67
<b>Promedio</b>	<b>0.181</b>	<b>0.280</b>	<b>3.516</b>	<b>3.689</b>	<b>4.919</b>	<b>5.037</b>

Tabla 3.2: Resumen de los valores promedio para la estrategia de intersección con semáforo

$T_p$	Flujo Medio		Emision Media		Consumo Medio	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2
<b>0.1</b>	0.032	0.275	1.772	11.494	2.686	17.636
<b>0.2</b>	0.0619	0.259	2.933	11.239	5.064	17.314
<b>0.3</b>	0.089	0.227	4.097	10.059	7.321	15.876
<b>0.4</b>	0.116	0.195	5.725	8.682	10.19	14.113
<b>0.5</b>	0.1411	0.163	6.834	7.269	12.049	12.16
<b>0.6</b>	0.167	0.131	8.092	5.837	13.983	9.954
<b>0.7</b>	0.191	0.099	9.208	4.519	15.598	7.713
<b>0.8</b>	0.212	0.068	10.045	3.25	16.811	5.386
<b>0.9</b>	0.225	0.035	10.209	1.942	17.061	2.823
<b>Mean</b>	<b>0.137</b>	<b>0.161</b>	<b>6.546</b>	<b>7.143</b>	<b>11.196</b>	<b>11.442</b>

Los resultados sugieren que la estrategia de intersección con prioridad de cruce es mejor que en la intersección con semáforo. Este resultado adquiere mas sentido cuando regresamos a los diagramas de espacio tiempo de la Figura 3.4 y Figura 3.7. Un análisis más exhaustivo muestra que el tiempo de viaje ( $t_v$ ), desde la entrada de la vialidad a la intersección, en la intersección con prioridad es menos de doscientas iteraciones ( $t_v < 200$ ) y en la intersección con semáforo el tiempo de viaje es mayor a doscientas iteraciones ( $t_v > 200$ ). Tomando como margen de referencia un ciclo de semáforo, se puede observar que en ese periodo de tiempo el flujo de vehículos es menor en la intersección con semáforo que en la intersección con prioridad. Esto explica la diferencia de flujos entre intersecciones.

Algo que también se puede observar en los diagramas es la frecuencia con la cual un vehículo tiende a frenar debido a que tiene un vehículo o grupo de vehículos enfrente. Cuando los vehículos frenan totalmente por algún motivo y posteriormente reanudan su viaje se dice que se ha generado el fenómeno parada-arranque. En este fenómeno el vehículo tiene que volver a acelerar para reanudar su viaje y tal como se comentó en la sección 3.1, ocasiona un mayor consumo de combustible y genera mas emisiones de CO<sub>2</sub>. Este fenómeno es más frecuente en la intersección con semáforo en comparación con la intersección con prioridad de cruce. Lo anterior explica porque hay mayor consumo de combustible y generación de emisiones aun cuando el flujo de vehículos es menor en la intersección con semáforo que en la intersección con prioridad de cruce.

### 3.4 Modelo de RNA

Se utilizó el algoritmo Levenberg-Marquardt (LM) como algoritmo de aprendizaje para optimizar la función de error. La estimación de error se realizó con la RMSE (Root-Mean-Square-Error en inglés). La base de datos se dividió en tres grupos. 1) Entrenamiento (70% de los datos), 2) Validación (15% de los datos) y 3) Prueba (15% de los datos).

1. **Entrenamiento:** Estos se presentan a la red durante el entrenamiento y la red se ajusta de acuerdo con su error.

2. **Validación:** Estos se utilizan para medir la generalización de la red y para detener el entrenamiento cuando la generalización de jade mejorar.
3. **Prueba:** Estos no tienen ningún efecto sobre el entrenamiento y, por tanto, proporcionan una medida independiente del rendimiento de la red durante y después del entrenamiento.

Los modelos entrenados contienen 60 elementos (40 elementos de la matriz  $w_1$  y 20 elementos de la matriz  $w_0$ ) y 12 bias (10 de  $b_1$  y 2  $b_2$ ). Estos coeficientes se sustituyen la ecuación 2.2 y se obtienen valores correspondientes al AC. En la Figura 3.1 se muestran los pesos y los bias de la RNA.  $w_1$  es la matriz de pesos de la capa oculta con las entradas,  $w_0$  es la matriz de pesos de las salidas con la capa oculta,  $b_1$  son los bias de la capa oculta y  $b_0$  son los bias de las salidas de la RNA. Las tablas de bias y pesos de todas las RNAs entrenadas se encuentran el Anexo A.

Tabla 3.3: Parámetros de la RNA SE-5-10-2

$w_1$	-0.54945046	-1.08771889	0.00563804	0.90206954	-0.01053354					
	0.34202623	-0.00496885	-0.54466116	-0.00774046	0.51505815					
	-0.55156887	-1.07980634	0.00553594	0.90282749	-0.01051102					
	0.33622412	-0.00493499	-0.54513253	-0.00774034	0.5082731					
	0.50082162	0.22962466	-0.00461534	0.26251177	-0.00820822					
	1.00780557	-0.00433369	5.22274291	-0.00453187	-0.72880451					
	1.12877252	-0.98964224	0.00845818	-1.00489781	-0.01041886					
	0.56257486	-0.00820361	-0.13786783	-0.015036	-0.3643695					
	0.69912512	-3.76935164	-0.0084641	0.56217212	0.01044451					
	0.98412308	0.00438439	0.52926693	0.00639568	0.84198687					
$w_0$	-108.970127	-1.34647838	109.979202	1.34201061	1.51006893	0.00127919	0.55955661	-0.10164445	-1.0838865	-0.01650619
	0.8641876	-120.354314	-0.8721215	120.624527	-0.06792616	0.80446198	-0.00834636	-1.38948467	0.00291906	0.92755715
$b_1$			1.4460215							
			-0.33072125							
			1.44385716							
			-0.32536915							
			0.0500383							
			5.47574196							
			1.48423462							
			-0.12331295							
			-4.17415313							
			0.78458926							
$b_0$			-2.52480005							
			-1.97035854							

En la Tabla 3.4 se resumen las RNA entrenadas para la estrategia de intersección con prioridad de cruce e intersección con semáforo. Se entrenaron 6 RNA (3 de la estrategia de intersección con prioridad de cruce y 3 de la intersección con semáforo).

Tabla 3.4: Resumen de las RNAs entrenadas.

Estrategía	Magnitud de Salida	Numero de entradas	Numerode Neuronas en Capa oculta	Numero de salidas	Nombre RNA	R
Probabilidad de cruce	Flujo	5	10	2	RNA PF-5-10-2	0.959
	Emision				RNA PE-5-10-2	0.959
	Consumo				RNA PC-5-10-2	0.957
Semáforo	Flujo	5	10	2	RNA SF-5-10-2	0.993
	Emision				RNA SE-5-10-2	0.987
	Consumo				RNA SC-5-10-2	0.989

Como se mostró en la Figura 2.7, cada RNA consiste en 5 entradas, 10 neuronas en la capa oculta y 2 salidas. Las 2 salidas de la RNA son las magnitudes flujo, emisión o consumo de la vialidad 1 y vialidad 2. Es decir, la RNA PF-5-10-2, nos dará el flujo de vialidad 1 y el flujo de la vialidad 2 de la estrategia intersección con prioridad de cruce y siguiendo la misma lógica la RNA SE-5-10-2 nos dará la emisión de CO<sub>2</sub> de la vialidad 1 y la vialidad 2 de la estrategia de intersección con semáforo. En la última columna de la tabla se puede observar el coeficiente de correlación de las RNAs. La correlación lineal nos indica hasta qué punto dos variables están relacionadas entre sí. Se dice que existe correlación lineal entre dos variables cuando existe una correlación y los puntos graficados de los datos pareados dan como resultado un patrón que se puede aproximar mediante una línea recta. En general el coeficiente de correlación lineal está entre -1 y 1. Si  $R$  es cercano a -1 o 1, podría haber una correlación y cuando  $R$  es cercano a 0, no parece haber correlación lineal alguna (Triola, 2018). Dicho lo anterior se puede observar que los coeficientes de correlación de las RNAs son muy buenos ya que están muy cercanas a 1. En la Figura 3.9 se muestran las curvas de correlación lineal de las estimaciones de la RNA SF-5-10-2 contra los datos del AC. Los círculos son los datos, la línea punteada en cada gráfica representa el resultado perfecto y la línea sólida representa la mejor línea de regresión lineal entre las salidas y los objetivos.

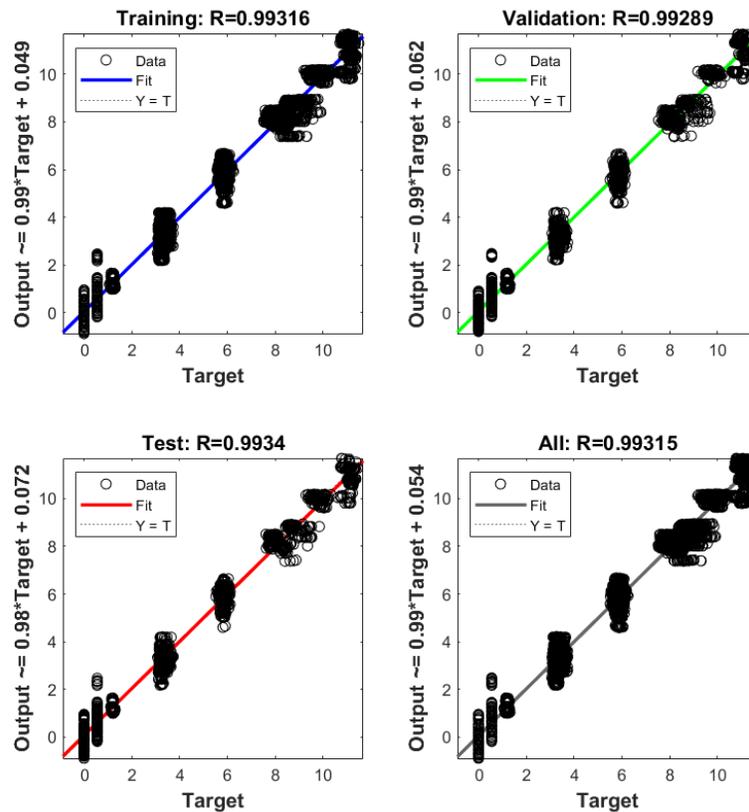


Figura 3.9: Comparación estadística entre el flujo del AC y las estimadas por la RNA SF-5-10-2

En las siguientes figuras se muestran las curvas de flujo, emisión y consumo del AC y de las RNAs para la intersección con estrategia de prioridad (Figura 3.10) y para la estrategia de semáforo (Figura 3.10). Las curvas de las Figura 3.10a-c corresponden a la vialidad 1, mientras que las curvas de las Figura 3.10d-f corresponden la vialidad 2. Las Figura 3.10a y d corresponden al flujo en las vialidades 1 y 2, respectivamente. Similar para las Figura 3.10b y e, que son las curvas de emisión, y las curvas de las Figura 3.10c y f, curvas de consumo. La curva de línea continua con cuadrados corresponde a los datos generados por el AC. La curva con línea discontinua y círculos corresponde a los datos estimados por las RNAs. Las curvas de las RNAs tienen un buen ajuste a las del AC. Las curvas de las Figura 3.10a-c, inician en cero, cuando  $\alpha_1 = 0$ , y van incrementando su valor, conforme  $\alpha_1$  incrementa, hasta llegar a una meseta. En las Figura 3.10d-f, las curvas inician con valores diferentes a cero, cuando  $\alpha_1 = 0$ , mientras que para la Figura 3.10d la tendencia es a la baja, conforme  $\alpha_1$  incrementa, para las Figura 3.10e y f es al alza, conforme  $\alpha_1$  incrementa. De la Tabla 3.4., podemos recordar que la correlación de los datos del AC y las RNAs son bastantes similares, comprobado a partir de que  $R$  es cercano a 1 ( $R > 0.95$ ) para la estrategia de prioridad. Esto explica porque las curvas de las RNAs se ajustan a la forma que tienen las curvas del AC.

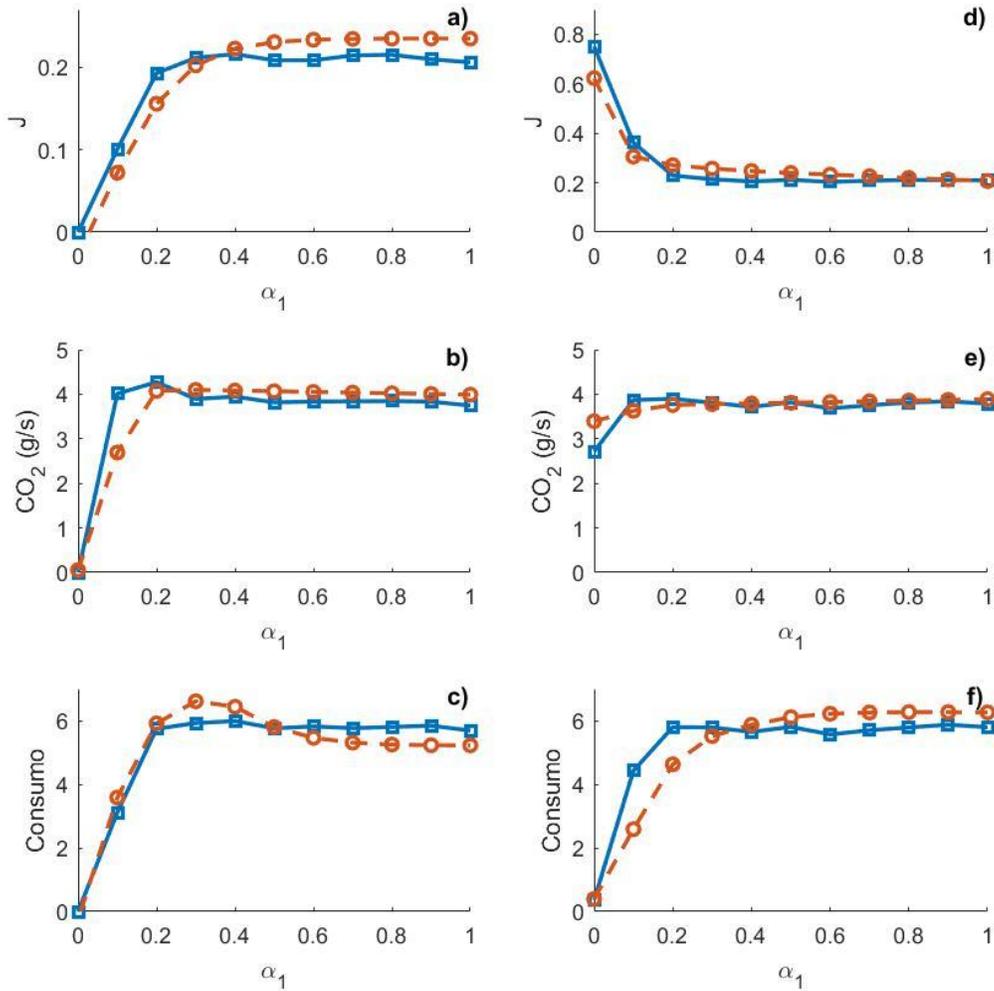


Figura 3.10: Curvas de flujo, emisión y consumo para la estrategia de intersección con prioridad de cruce.

Similar a la Figura 3.10, las curvas de las Figura 3.11a-c corresponden a la vialidad 1 y las curvas de las Figura 3.11d-f corresponden a la vialidad 2. Se puede observar que las curvas de las RNAs se ajustan mejor a las del AC en comparación al comportamiento de ajuste de las RNAs de la estrategia de intersección con prioridad. Esto se debe a que la correlación que existe entre los datos del AC y de las RNAs es aún mucho mejor en la estrategia de intersección con semáforo en comparación a la estrategia de intersección con prioridad. Recordemos de la Tabla 3.4, que los coeficientes de correlación lineal son mayores a 0.98 ( $R > 0.98$ ).

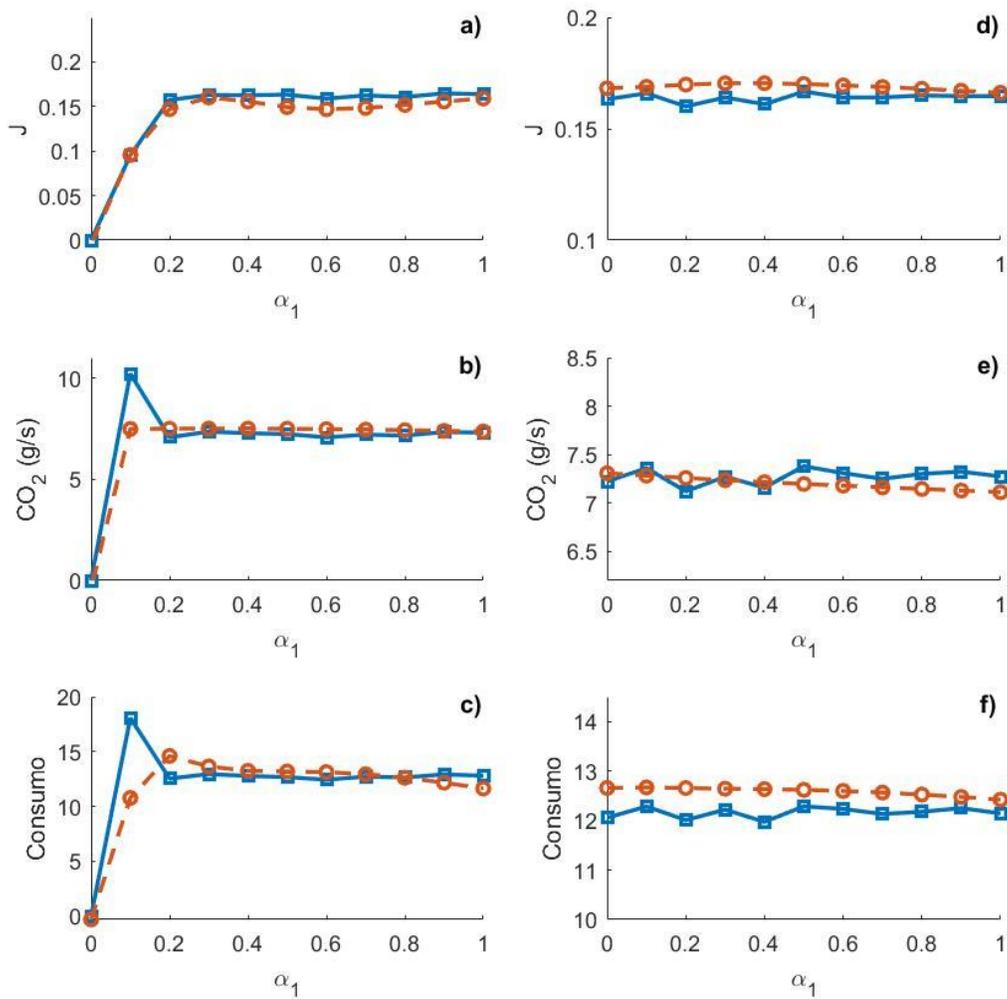


Figura 3.11: Curvas de flujo, emisión y consumo para la estrategia de intersección con semáforo.

## 4 Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un sistema de intersección de dos vialidades con condiciones de frontera abierta. También se han desarrollado dos estrategias de cruce: intersección con prioridad de cruce e intersección con semáforo. Los vehículos en el sistema evolucionan a través del AC NaSchM de tres fases.

Se ha observado que, en la estrategia de intersección con prioridad de cruce, el flujo de vehículos en una vialidad se ve influenciado por el flujo de vehículos de la otra vialidad. Es decir, cuando el flujo incrementa en la vialidad con mayor prioridad, el flujo disminuye en la vialidad con menor prioridad y a su inversa. También se observó que la variación en el flujo de vehículos influye en la variación de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo de combustible. En la intersección con semáforo se observó que el flujo de vehículos está influenciado por el parámetro  $T_p$ . A diferencia de la intersección con prioridad de cruce, el incremento en el flujo de una vialidad no afecta el flujo de la otra.

Los resultados obtenidos muestran que el flujo en la intersección con prioridad de cruce es mejor que en la estrategia de intersección con semáforos. También se observa que el consumo energético y las emisiones son mucho menores en la intersección con prioridad de cruce que en la intersección con semáforos.

Se generaron dos bases de datos: una para la intersección con semáforo y otra de la intersección con prioridad de cruce. Ambas bases de datos cuentan con 7,776 datos. Los datos elegidos para entrenar las RNAs son: probabilidad de entrada en la vialidad 1, probabilidad de entrada en la vialidad 2, probabilidad de salida en la vialidad 1, probabilidad de salida en la vialidad 2, probabilidad de cruce; para la intersección con regla de prioridad, y proporción de tiempo que el semáforo va a estar en verde en la vialidad 1. La combinación de estos parámetros da como resultado variaciones en el flujo, emisión de CO<sub>2</sub> y consumo energético.

Para cada estrategia de cruce se entrenaron 3 RNAs. Es decir, 6 RNAs en total. Cada RNA da un parámetro de salida para la vialidad 1 y la vialidad 2. Esto se resume en la Tabla 3.4. El coeficiente de correlación para las RNA fue mayor a 0.95 ( $R > 0.95$ ). Esto permite que las RNAs puedan predecir o emular parámetros de salida adecuados y muy similares a los que genera el AC.

## Referencias

- Yoro, K. O. & Daramola, M. O. (2020). CO<sub>2</sub> emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. *Advances in Carbon Capture*, 3-28. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819657-1.00001-3>
- Conde, R. V. (2014). *Ecología* [Libro electrónico]. Grupo Editorial Patria.
- Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G. J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khourdajie, A. A., House, J., Pachauri, S., Figueroa, M., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S. K., Khennas, S., de la Rue Du Can, S., . . . Minx, J. (2021). A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters*, 16(7), 073005
- Santos, G. (2017). Road transport and CO<sub>2</sub> emissions: What are the challenges? *Transport Policy*, 59, 71–74. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.06.007>.
- Molina, M., Sarukhán, J., Carabias, J., Méndez, G. G., & Calderón, W. G. (2017). *El cambio climático*. Fondo de Cultura Económica.
- Hauer, M.E., Fussell, E., Mueller, V., Burkett, M., Call, M., Abel, K., McLeman, R., & Wrathall, D. (2020). Sea-level rise and human migration. *Nat Rev Earth Environ* 1, 28–39 <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0002-9>
- Hazra, S., Mukhopadhyay, A., Mukherjee, S., Akhand, A., Chanda, A., Mitra, D., & Ghosh, T. (2016). Disappearance of the New Moore Island from the Southernmost Coastal Fringe of the Sundarban Delta - A Case Study. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44(3), 479–484. <https://doi.org/10.1007/s12524-015-0524-7>
- RT en Español. (2015, 13 mayo). Conozca la isla que existió solo durante 40 años y desapareció por culpa del cambio climático. Recuperado 3 de junio de 2022, de <https://actualidad.rt.com/actualidad/174745-isla-existio-40-anos-new-moo-banglades>
- Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I. P., Lešić, V., & Lemić, D. (2021). The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests. *Insects*, 12(5), 440. <https://doi.org/10.3390/insects12050440>
- Teixeira, A. C. R. & Sodré, J. R. (2018, marzo). Impacts of replacement of engine powered vehicles by electric vehicles on energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, 375-384. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.004>
- Huang, Y., Surawski, N. C., Organ, B., Zhou, J. L., Tang, O. H., & Chan, E. F. (2019). Fuel consumption and emissions performance under real driving: Comparison between hybrid and conventional vehicles. *Science of The Total Environment*, 659, 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.349>
- Ghosh, A. (2020). Possibilities and Challenges for the Inclusion of the Electric Vehicle (EV) to Reduce the Carbon Footprint in the Transport Sector: A Review. *Energies*, 13(10), 2602. <https://doi.org/10.3390/en13102602>

- Macrina, G., Laporte, G., Guerriero, F., & di Puglia Pugliese, L. (2019). An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet, partial battery recharging and time windows. *European Journal of Operational Research*, 276(3), 971–982. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.067>
- de Oliveira Da Costa, P. R., Mauceri, S., Carroll, P., & Pallonetto, F. (2018). A Genetic Algorithm for a Green Vehicle Routing Problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 64, 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2018.01.008>
- Prego, C. (2022, 16 mayo). «Cities: Skylines» ha evitado que Polonia construya una carretera con fallos: cómo los videojuegos nos. . . Xataka. Recuperado 6 de junio de 2022, de [https://www.xataka.com/videojuegos/cities-skylines-ha-evitado-que-polonia-construya-carretera-fallos-como-videojuegos-nos-estan-ayudando-a-mejorar-nuestras-ciudades?utm\\_content=buffer6eee8&utm\\_medium=social&utm\\_source=facebook.com&utm\\_campaign=buffer&fbclid=IwAR1YOLrhN\\_mjQYFLjDZJiix1wlp5mNrHKJW\\_I6W5AOE0Jkai-2AgIItnaaM](https://www.xataka.com/videojuegos/cities-skylines-ha-evitado-que-polonia-construya-carretera-fallos-como-videojuegos-nos-estan-ayudando-a-mejorar-nuestras-ciudades?utm_content=buffer6eee8&utm_medium=social&utm_source=facebook.com&utm_campaign=buffer&fbclid=IwAR1YOLrhN_mjQYFLjDZJiix1wlp5mNrHKJW_I6W5AOE0Jkai-2AgIItnaaM)
- Higashi, K., Satsuma, J., & Tokihiro, T. (2021). Rule 184 fuzzy cellular automaton as a mathematical model for traffic flow. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 38(2), 579–609. <https://doi.org/10.1007/s13160-021-00461-3>
- Biham, O., Middleton, A. A., & Levine, D. (1992). Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models. *Physical Review A*, 46(10), R6124-R6127. <https://doi.org/10.1103/physreva.46.r6124>
- Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12), 2221–2229. <https://doi.org/10.1051/jp1:1992277>
- Kerner, B. S., Klenov, S. L., & Wolf, D. E. (2002). Cellular automata approach to three-phase traffic theory. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 35(47), 9971–10013. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/35/47/303>
- Kerner, B. S., & Rehborn, H. (1996). Experimental properties of complexity in traffic flow. *Physical Review E*, 53(5), R4275-R4278. <https://doi.org/10.1103/physreve.53.r4275>
- Chmura, T., Herz, B., Knorr, F., Pitz, T., & Schreckenberg, M. (2014). A simple stochastic cellular automaton for synchronized traffic flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 405, 332–337. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.03.044>
- Int Panis, L., Broekx, S., & Liu, R. (2006). Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Science of The Total Environment*, 371(1–3), 270–285. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.08.017>
- Pérez-Sansalvador, J. C., Lakouari, N., Garcia-Diaz, J., & Hernández, (2020). The Effect of Speed Humps on Instantaneous Traffic Emissions. *Applied Sciences*, 10(5), 1592. <https://doi.org/10.3390/app10051592>.
- Lakouari, Noureddine & Oubram, Outmane & Bassam, A. & Hernandez, Saul & Marzoug, Rachid & Ez-Zahraouy, Hamid. (2019). Modeling and simulation of CO<sub>2</sub> emissions in roundabout intersection. *Journal of Computational Science*. 40. 101072. [10.1016/j.jocs.2019.101072](https://doi.org/10.1016/j.jocs.2019.101072)

- Binoua, H., Ez-Zahraouy, H., Khallouk, A., & Lakouari, N. (2020). Carbon dioxide emission in a single-lane cellular automaton model with a series of traffic lights. *International Journal of Modern Physics C*, 31(11), 2050154. <https://doi.org/10.1142/s0129183120501545>
- Mohan, R., & Ramadurai, G. (2013). State-of-the art of macroscopic traffic flow modelling. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 5(2–3), 158–176. <https://doi.org/10.1007/s12572-013-0087-1>
- Mardiati, R., Ismail, N., Faruqi, A. (2014). Review of microscopic model for traffic flow. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 9. 1794-1800.
- Liu, Y. (2008). *Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata (English Edition) (1.a ed.)*. CRC Press.
- Biggs, A., Hagins, W., Holliday, W., Kapicka, C., Lundgren, L., MacKenzie, A., Rogers, W., Sewer, M., & Zike, D. (2011). *Glencoe Biology, Spanish Student Edition (Student ed.)*. McGraw-Hill Companies.
- Viñuela, P. I., & León, I. M. G. (2004). *Redes de neuronas artificiales*. Pearson Educación.
- May, O. (2020). Optimización económico-ambiental de sistema de concentradores de canal parabólico para calor de proceso industrial mediante herramientas de cómputo avanzado. Universidad Autónoma de Yucatán.
- Berzal, F. (2018). *Redes Neuronales & Deep Learning (Spanish Edition)*. Independently published.
- Treiber, M., Kesting, A., Thiemann, C. (2008): How much does traffic congestion increase fuel consumption and emissions? Applying a fuel consumption model to the NGSIM trajectory data. In 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC 71, 1–18.
- Stathakis, D. (2009). How many hidden layers and nodes? *International Journal of Remote Sensing*, 30(8), 2133–2147. <https://doi.org/10.1080/01431160802549278>
- Triola, M. F. (2018). *Estadística (12.a ed.)*. PEARSON.
- Chacoma, A., Abramson, G., & Kuperman, M. (2021). A phase transition induced by traffic lights on a single lane road. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 568, 125763. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125763>

## A. Anexo A

Tabla A.1: Pesos y bias de RNA SF-5-10-2

$w_1$										
$w_0$	-108.970127	-1.34647838	109.979202	1.34201061	1.51006893	0.00127919	0.55955661	-0.10164445	-1.0838865	-0.01650619
	0.8641876	-120.354314	-0.8721215	120.624527	-0.06792616	0.80446198	-0.00834636	-1.38948467	0.00291906	0.92755715
$b_1$				1.4460215						
				-0.33072125						
				1.44385716						
				-0.32536915						
				0.0500383						
				5.47574196						
				1.48423462						
				-0.12331295						
				-4.17415313						
				0.78458926						
$b_0$				-2.52480005						
				-1.97035854						

Tabla A.2: Pesos y bias de RNA SE-5-10-2

$w_1$										
$w_0$	-0.015249	-0.132658	0.0023184	-0.01689	1.1143772	-0.71673	0.004857	2.4215101	3.6948012	1.8909963
	3.9108325	-7.617337	-0.84875	3.5649134	-0.002614	0.0036654	1.5620253	-0.07646	-0.164033	-0.561879
$b_1$				1.5414855						
				-0.413979						
				-5.496094						
				-1.608609						
				9.8158421						
				-0.711709						
				0.7231411						
				0.5078657						
				-0.219423						
				0.0605516						
$b_0$				-1.900118						
				-4.967321						

Tabla A.3: Pesos y bias de RNA SC-5-10-2

$w_1$	0.163206	0.0586097	0.0018436	-0.45735882	-0.00303644				
	-0.00365086	0.00184438	7.86351543	-0.00081679	0.33171723				
	-0.0569957	-0.00390544	-0.00504118	0.00022827	-0.37990104				
	-1.55917625	0.0093206	-0.01682286	0.00521437	-0.84969157				
	-1.01586323	-0.33197299	-0.00472025	-0.17215259	0.01547697				
	-0.81861859	4.1024926	0.01183796	-0.80591323	0.00537952				
	-0.75452214	4.1051115	0.00861394	-0.74024689	0.00501822				
	0.88707137	-0.01133111	4.23309279	0.00751072	0.39480122				
	-1.93579004	0.17940183	-0.00530367	1.13050188	-0.00092438				
	0.81556606	-0.00281852	7.184355	0.00331373	0.51051411				
$w_0$	-9.14027893	0.0726912	0.0081131	0.00743133	-0.55632587	-4.79787568	5.8188197	-0.00739456	-0.51405485
	-0.02430569	-7.6435755	-11.7058374	1.0974816	0.0738107	0.0165601	-0.01220569	-1.21692488	0.01597397
$b_1$				-1.63872196					
				8.86262449					
				-1.45034756					
				1.30872529					
				-0.02537939					
				3.92845564					
				4.03197819					
				4.1873011					
				-1.59198052					
				6.52223843					
$b_0$				-9.96821932					
				-5.0993963					

Tabla A.4: Pesos y bias de RNA PF-5-10-2

$w_1$	-0.53270218	0.27163797	0.72525626	-10.9148935	0.55311237				
	-0.13341749	0.54394713	-8.33955903	0.77988149	-0.2078628				
	-0.03620485	0.06460143	0.70139036	-0.06706957	-0.356033				
	-0.07710278	-0.08741352	-0.36606231	0.03283223	-0.1160492				
	0.39639586	0.20604845	-0.19853525	-1.98048263	0.20415109				
	0.27986415	-2.51819907	-0.18872037	0.37782091	0.3065258				
	0.09377792	-7.68923001	0.49033544	-0.25214778	0.68826681				
	0.33606303	0.04140938	0.35670958	0.00436954	-0.07576941				
	0.06342281	-0.03468784	-0.6584513	0.04968761	0.42495314				
	0.36877145	0.33329816	0.60234127	0.55834625	-11.1910093				
$w_0$	-0.07889584	1.53093025	-1.23818174	-0.53137479	-0.48849661	-0.54966966	0.00787591	0.51575819	-0.72687785
	-0.2995654	-0.19158862	-9.13803326	-4.77831324	-0.08320808	0.07761783	2.54546306	-0.5842713	-8.66942359
$b_1$				-11.193024					
				-9.78802454					
				0.3291042					
				-0.70292812					
				-2.17908951					
				-2.71849671					
				-9.43028059					
				-0.22840565					
				-0.40935135					
				-11.3101547					
$b_0$				-0.42876842					
				-2.0268222					

Tabla A.5: Pesos y bias de RNA PE-5-10-2

$w_1$	-0.04494404	0.02983281	-3.88991791	0.08079448	-0.51934463						
	-0.1297827	9.94286795	0.00902249	-0.65993682	-0.57414828						
	0.00496958	-0.87430919	-0.16748554	5.57065876	-0.85028374						
	0.09343204	-0.03477269	5.38346601	-0.15798105	0.28307693						
	0.44493513	-0.82471473	-7.93791361	-0.25813303	-0.8472214						
	-0.18399086	0.16391962	0.08807356	-1.73362225	-2.15007778						
	-0.64310453	1.13618822	0.23387757	3.99165953	-0.81599392						
	0.62849105	-0.12875567	0.07101488	-0.24725365	0.41881561						
	0.19805463	-0.05683919	0.09327588	-0.71142503	3.85396733						
	-0.01911846	0.04284252	-4.96612759	0.10776676	-0.93123895						
	$w_0$	8.28923316	0.80358917	0.45765716	2.30805787	-0.08385681	-0.24687253	0.30583459	0.22988557	0.56635624	-3.42378253
		10.8065653	0.06556455	0.50652102	4.6076814	-0.12551442	-0.27596451	0.08366169	-0.23622447	0.74694393	-3.95735035
	$b_1$				-4.25631039	9.51292512	5.44785234	5.43555583	-4.29196069	-1.80600323	2.92239422
					-1.13776998	3.45423534	-5.01782014				
$b_0$				0.6118654	0.8965099						

Tabla A.6: Pesos y bias de RNA PC-5-10-2

$w_1$	0.06446775	2.17417135	-0.27204578	-0.2770555	-1.01336101						
	-0.44470116	8.3226399	0.42949908	0.02694542	-2.98528849						
	0.54087163	0.30137039	-0.30321575	-1.32752703	0.18362681						
	-0.02215194	-3.6018217	0.29443776	0.28373508	0.75921896						
	-0.0419713	-0.07536273	3.90781101	-0.3282939	-0.89454552						
	0.03061267	0.01642925	-4.24978703	0.27829924	1.24327453						
	-0.03266051	0.01699493	-2.50459825	0.38072426	0.03748382						
	-0.00341917	-0.09650699	0.03890532	-1.84400027	-1.79358683						
	0.05678687	-0.03264967	-0.43833401	-0.61656871	4.66376399						
	0.06573992	0.50746458	0.06925048	-4.53049257	0.63223346						
	$w_0$	-2.63417203	0.33240658	0.20879026	-3.1521346	-4.57928953	-3.55112049	-1.75121067	-0.43119478	0.77402376	-1.0138539
		0.72209401	-0.08408238	-0.21057099	-0.50052893	-5.12682286	-4.08750606	-2.25866711	-0.27940462	0.97007836	-0.71377036
	$b_1$				3.20607878	6.04357477	-0.21086255	-4.37553488	2.61875796	-2.89984797	-2.03814067
					-1.79218177	4.5943942	-4.45974097				
$b_0$				-3.14874938	-3.75059549						