

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



APLICACIÓN DE REDES NEURONALES PARA OBTENER UN FLUJO ÓPTIMO  
DE PERSONAS EN SANTIAGO DE SURCO

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADA POR

Bach. ALCOVÉ PAREDES, DANIEL IVÁN

Asesor: Dr. Ing. HUAMANÍ NAVARRETE, PEDRO

LIMA-PERÚ

2019

## DEDICATORIA

A mi Madre, las gracias eternas por su ejemplo, por ser esa persona que necesité en cada momento... cualquier cosa que diga jamás será suficiente para agradecerle su apoyo incondicional...

A mi hermana, por su apoyo y consejo, por todo su cariño... es un privilegio ser parte de su vida...

A mis hermanos y primos por todo su cariño...

Y para Ani, gracias por esa sonrisa... por ese abrazo, en las buenas y en las otras, gracias por estar siempre allí.

Daniel Iván Alcové Paredes

## AGRADECIMIENTO

Al Dr. Pedro Huamaní Navarrete y a la Dra. Margarita Murillo Manrique por todo el apoyo entregado en la elaboración de este humilde trabajo, quedo en deuda con ambos...

Daniel Iván Alcové Paredes

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	x
ABSTRACT .....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.1. Problemática.....	3
1.1.1. Problema General .....	3
1.1.2. Problemas Específicos.....	3
1.2. Objetivos .....	4
1.2.1. Objetivo General .....	4
1.2.2. Objetivos Específicos .....	4
1.3. Importancia y justificación.....	5
1.3.1. Importancia.....	5
1.3.2. Justificación.....	5
1.4. Alcances y limitaciones .....	5
1.4.1. Alcances .....	5
1.4.2. Limitaciones .....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	7
2.1.    Antecedentes del estudio de investigación .....	7
2.1.1.    Antecedentes Nacionales.....	7
2.1.2.    Antecedentes Internacionales .....	8
2.2.    Bases teóricas relacionadas con el tema.....	9
2.2.1.    Flujo de personas en transporte motorizado.....	9
2.2.2.    Redes neuronales: Nueva aproximación a la resolución de problemas.....	10
2.2.3.    Red Neuronal Multicapa Backpropagation (MLP) .....	11
2.2.4.    Red neuronal Radial Basis Function (RBF) .....	13
2.3.    Variables de Estudio.....	15
2.4.    Tipo y método de investigación .....	16
2.4.1.    Tipo de investigación .....	16
2.4.2.    Método de investigación.....	16
2.4.3.    Diseño de investigación.....	16

2.5.	Instrumento de recolección de datos .....	16
2.6.	Técnicas de recolección de datos .....	16
CAPÍTULO III: DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....		18
3.1.	Grabación de video.....	20
3.2.	Transcripción de valores recogidos .....	22
3.3.	Ingreso a programa simulador de flujo.....	23
3.4.	Acondicionamiento de datos para entrenamiento de red neuronal.....	28
CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS .....		29
4.1.	Creación y entrenamiento de la red neuronal utilizando MATLAB. ....	29
4.1.1	Perceptrón Multicapa.....	30
4.1.2	Radial Basis Function.....	36
4.2.	Testeo de la red neuronal utilizando MATLAB.....	38
4.2.1	Perceptrón Multicapa.....	38
4.2.2	Radial Basis Function.....	41
CONCLUSIONES .....		43
RECOMENDACIONES.....		44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		45

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Representación esquemática del concepto de la congestión de tránsito. ...	10
Figura N° 2 Red Backpropagation completamente interconectada. ....	12
Figura N° 3 Comparativa de funciones de transferencia sigmoidea y tangente hiperbólica. ....	13
Figura N° 4 Red neuronal Radial Basis Function. ....	14
Figura N° 5 Función Gaussiana. ....	15
Figura N° 6 Ciclo semafórico actual. ....	18
Figura N° 7 Tecnologías requeridas por el sistema. ....	19
Figura N° 8 Fases del desarrollo de la aplicación. ....	19
Figura N° 9 Puntos de filmación de flujo de vehículos. ....	20
Figura N° 10 Formato de ingreso de datos. ....	23
Figura N° 11 Simulación de flujo de personas desarrollado en VB.NET. ....	24
Figura N° 12 Contenido de cada campo. ....	24
Figura N° 13 Evolución de registros de datos. ....	25
Figura N° 14 Área del formulario de simulación de ingreso de vehículos. ....	25
Figura N° 15 Cuadros de texto para ingreso de número de vehículos por tipo. ....	26
Figura N° 16 Información de cantidad de personas por tipo de vehículo. ....	26
Figura N° 17 Salida por tipo de vehículo. ....	27
Figura N° 18 Simulador del control de dispositivos dentro del formulario. ....	27
Figura N° 19 Número de personas por tipo de vehículo que salió de la intersección. ....	28
Figura N° 20 Capas ocultas de red neuronal MLP para primer entrenamiento. ....	30
Figura N° 21 Respuestas de la RNA MLP durante primer entrenamiento. ....	31
Figura N° 22 Capas ocultas de red neuronal MLP para segundo entrenamiento. ....	32
Figura N° 23 Respuestas de RNA MLP durante segundo entrenamiento. ....	33
Figura N° 24 Capas ocultas de red neuronal MLP para tercer entrenamiento. ....	34
Figura N° 25 Respuestas de RNA MLP durante tercer entrenamiento. ....	35
Figura N° 26 Configuración de red neuronal RBF para primer entrenamiento. ....	36

Figura N° 27 Rendimiento durante el entrenamiento de la red RBF.....	36
Figura N° 28 Configuración de red neuronal RBF para segundo entrenamiento. ....	37

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Fecha y duración de videos. ....	21
Tabla N° 2: Selección de videos. ....	22
Tabla N° 3: Tipos de vehículos y factor por cantidad de pasajeros. ....	22
Tabla N° 4: Salida primer entrenamiento de red MLP vs. salida deseada. ....	38
Tabla N° 5: Salida segundo entrenamiento de red MLP vs. salida deseada. ....	39
Tabla N° 6: Salida tercer entrenamiento de red MLP vs. salida deseada. ....	40
Tabla N° 7: Matriz de salida de primera red RBF testeada vs. salida deseada. ....	41
Tabla N° 8: Matriz de salida de segunda red RBF testeada vs. salida deseada. ....	42

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación N° 1: Función sigmoideal.....	12
Ecuación N° 2: Función tangente hiperbólica.....	12
Ecuación N° 3: Algoritmo LMS .....	15
Ecuación N° 4: Cálculo de la distancia de cámaras .....	21
Ecuación N° 5: Cálculo de la cantidad de segundos.....	22

## RESUMEN

El deseo de toda sociedad es habitar una ciudad sostenible que ofrezca accesibilidad real y total a cada uno de sus ciudadanos, así como también que los recursos se consuman más eficientemente. Es así que, uno de los principales problemas que afecta a la ciudad de Lima es el caos y el desorden en la movilidad urbana debido, principalmente, al crecimiento demográfico y a la nula planificación urbanística, vial y tecnológica. Las pérdidas económicas y los problemas medioambientales y sociales, a causa de la caótica congestión vehicular, aumentan cada día.

De esta manera, teniendo presente la necesidad de mejorar el tránsito en la ciudad, se propuso la aplicación de redes neuronales para obtener un flujo óptimo de personas en el distrito de Santiago de Surco. Por ello, a través de una aplicación desarrollada en Visual Studio se simuló la salida eficiente de personas que se desplazan en transporte motorizado en la intersección de las avenidas Alfredo Benavides y Caminos del Inca, del distrito de Santiago de Surco en Lima, dando preferencia al movimiento de vehículos en función de la cantidad de pasajeros que transportan, optimizando los ciclos y las fases del dispositivo de control. Los registros de esa observación, previo procesamiento, entrenaron dos tipos de redes neuronales, Perceptron Multicapa y Radial Basis Function a través de la herramienta Neural Network Tools del software Matlab. Asimismo, para el caso de la red Perceptron Multicapa se emplearon 3 topologías distintas, y para Radial Basis Function solamente 2.

De esta manera, se comprobó mediante el testeado que una de las topologías de red Perceptron Multicapa logró mejores resultados al presentar un error cuadrático medio igual a 0.00019.

Palabras claves: Flujo Vehicular, Redes Neuronales Artificiales, Perceptrón Multicapa, Backpropagation, Radial Basis Function.

## ABSTRACT

The desire of every society is to inhabit a sustainable city that offers real and total accessibility to each of its citizens, as well as that resources are consumed more efficiently. Thus, one of the main problems affecting the city of Lima is chaos and disorder in urban mobility, mainly due to population growth and zero urban, road and technology planning. Economic losses and environmental and social problems, due to the chaotic traffic congestion, increase every day.

Thus, taking into account the need to improve traffic in the city, the application of neural networks was proposed to obtain an optimal flow of people in the district of Santiago de Surco. Therefore, through an application developed in Visual Studio, the efficient departure of people traveling by motorized transport was simulated at the intersection of Alfredo Benavides and Caminos del Inca avenues, in the Santiago de Surco district in Lima, giving preference to movement of vehicles based on the number of passengers they transport, optimizing the cycles and phases of the control device. The records of that observation, prior processing, trained two types of neural networks, Perceptron Multilayer and Radial Basis Function through the Neural Network Tools tool of Matlab software. Likewise, in the case of the Perceptron Multilayer network, 3 different topologies were used, and for Radial Basis Function only 2.

In this way, it was proved by testing that one of the Perceptron Multilayer network topologies achieved better results by presenting a quadratic error average equal to 0.00019.

**Keywords:** Vehicular flow, Artificial Neural Network, Multilayer Perceptron, Backpropagation, Radial Basis Function.

## INTRODUCCIÓN

Lima sufre el estrés ocasionado por el caos y desorden en el que se encuentran sumidas las principales arterias de la ciudad, producto del crecimiento exponencial del parque automotor, el número de desplazamientos y la falta de políticas consistentes en la gestión del tránsito durante las últimas décadas.

El presente estudio se aboca a la gestión del flujo de personas que se movilizan en transporte motorizado en la intersección de las avenidas Alfredo Benavides y Caminos del Inca en el distrito de Santiago de Surco, en Lima, con el desarrollo de herramientas de propósito específico, a fin de aliviar la problemática actual. Durante el desarrollo de este trabajo se optó por no incorporar a los peatones debido a la aleatoriedad de su desplazamiento.

En primer lugar, se caracterizó el flujo de personas en la intersección asignando un factor a cada vehículo, proporcional al volumen de pasajeros promedio que transporta. Durante la simulación del flujo de personas, se dio preferencia de paso a aquellos vehículos que transportaban mayor cantidad de personas.

Finalizada la simulación, se evaluó la capacidad de las redes neuronales artificiales para el análisis de la información en la intersección indicada, así como su habilidad de configurar automáticamente los dispositivos de control para mantener despejadas las vías y el tránsito fluido, utilizando la herramienta Neural Network Tools del software Matlab.

Para el entrenamiento de las redes seleccionadas, Perceptrón Multicapa y Radial Basis Function, se propuso que cada registro de entrada contenga la información del flujo ordenado de los últimos quince segundos observados. La salida deseada de la red se configuró como el estado de los dispositivos de control, y el color de ambos semáforos.

Dimensionadas las entradas y salidas del modelo, se entrenó el sistema con un bloque reservado para dicha actividad, correspondiente al 70% de los registros obtenidos.

Con el otro 30% se probó la pertinencia del uso de la tecnología y la eficiencia de cada una de las topologías probadas, haciendo uso de la misma herramienta.

Para la mejor realización de este trabajo se dividió en cuatro capítulos, cada de uno de los cuales se describe a continuación:

En el capítulo I se realiza el planteamiento ¿Es posible aplicar las redes neuronales artificiales para obtener un flujo de personas eficiente en el cruce de las avenidas Benavides y Caminos del Inca, del distrito de Santiago de Surco?, ¿Es posible diseñar, entrenar y evaluar, a través del software Matlab con ayuda de su herramienta Neural Network Toolbox, una red neuronal Perceptrón multicapa Backpropagation para obtener un flujo de personas eficiente en el cruce de las avenidas Benavides y Caminos del Inca, en el distrito de Santiago de Surco?, ¿Es posible diseñar, entrenar y evaluar, a través del software Matlab con ayuda de su herramienta Neural Network Toolbox, una red neuronal Radial Basis Function para obtener un flujo de personas eficiente en el cruce de las avenidas Benavides y Caminos del Inca, en el distrito de Santiago de Surco?, ¿Es viable comparar el desempeño de las redes neuronales artificiales Perceptrón multicapa Backpropagation y Radial Basis Function para determinar cuál de ellas ofrece un flujo de personas más eficiente en el cruce de las avenidas Benavides y Caminos del Inca, en el distrito de Santiago de Surco?

En el capítulo II se presenta los antecedentes nacionales e internacionales de estudios realizados correspondientes a las variables utilizadas, tanto del flujo de personas, por extensión del movimiento vehicular, y de las redes neuronales, entre estas últimas se explican las utilizadas en el presente estudio, las redes neuronales artificiales Perceptrón multicapa Backpropagation y Radial Basis Function. Asimismo, se presentan las variables de estudios empleadas, el tipo de investigación y las técnicas de recolección de datos.

En el capítulo III se presenta el desarrollo de la investigación, el procedimiento utilizado para alcanzar los datos, así como el preprocesado de los mismos para su presentación a la herramienta a utilizar.

En el capítulo IV se presenta la caracterización de los modelos propuestos como alivio a la problemática actual del flujo de personas, así como también se explica en base a los resultados alcanzados la definición de la mejor propuesta de solución.

Al final se presentan las conclusiones y recomendaciones.

## CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1. Problemática

La falta de implementación de tecnología en la gestión y control de tránsito ahonda el caos generado por el transporte, cuyo resultado es la pérdida de alrededor de mil millones de dólares en horas hombre por año en la ciudad (ONG Luz Ámbar, 2018).

Además de la falta de integración entre los diferentes sistemas de gestión y control de tránsito existentes, la tradicional programación por tiempos de los dispositivos electrónicos de control no ofrece una solución óptima al problema del flujo de personas en la ciudad. Como consecuencia de ello, el tiempo que el usuario de la vía puede pasar en una congestión vehicular ha aumentado, en tiempo y frecuencia, en las diferentes arterias de la ciudad.

La pérdida de tiempo ocasionada por el congestionamiento vehicular aumenta el nivel de estrés en los conductores, que se manifiesta en una actitud más agresiva de manejo y el consecuente aumento del riesgo automovilístico.

Por otro lado, según la OMS, en Lima, mueren cada año, más de 15 mil personas debido a enfermedades respiratorias y cardíacas ocasionadas por la contaminación ambiental. El mayor tiempo de uso de vehículos de combustión interna es directamente proporcional a la emisión de gases de efecto invernadero, provocando el aumento de la temperatura global y el cambio climático.

Adicionalmente, la Fundación Transitemos encontró que el parque automotor de 2,7 millones de vehículos en Lima y Callao, ocasiona pérdidas económicas del orden de los 11,2 millones de soles por sobreconsumo de combustible.

#### 1.1.1. Problema General

¿Es posible aplicar las redes neuronales artificiales para obtener un flujo de personas eficiente en el cruce de las avenidas Benavides y Caminos del Inca, del distrito de Santiago de Surco?

#### 1.1.2. Problemas Específicos

- a) ¿Es posible diseñar, entrenar y evaluar, a través del software Matlab con ayuda de su herramienta Neural Networks Toolbox, una red neuronal multicapa Backpropagation para obtener un flujo de personas eficiente en el

cruce de las avenidas Benavides y Caminos del Inca, en el distrito de Santiago de Surco?

- b) ¿Es posible diseñar, entrenar y evaluar, a través del software Matlab con ayuda de su herramienta Neural Networks Toolbox, una red neuronal Radial Basis Function para obtener un flujo de personas eficiente en el cruce de las avenidas Benavides y Caminos del Inca, en el distrito de Santiago de Surco?
- c) ¿Es viable comparar el desempeño de las redes neuronales artificiales multicapa Backpropagation y Radial Basis Function para determinar cuál de ellas ofrece un flujo de personas más eficiente en el cruce de las avenidas Benavides y Caminos del Inca, en el distrito de Santiago de Surco?

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Aplicar las redes neuronales artificiales para obtener un flujo de personas eficiente en el cruce de las avenidas Benavides y Caminos del Inca, del distrito de Santiago de Surco.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Diseñar, entrenar y evaluar, a través de Matlab con ayuda de su herramienta Neural Network Toolbox, una red neuronal multicapa Backpropagation para obtener un flujo de personas eficiente en el cruce de las avenidas Alfredo Benavides y Caminos del Inca, en el distrito de Santiago de Surco.
- b) Diseñar, entrenar y evaluar, a través de Matlab con ayuda de su herramienta Neural Network Toolbox, una red neuronal Radial Basis Function para obtener un flujo de personas eficiente en el cruce de las avenidas Alfredo Benavides y Caminos del Inca, en el distrito de Santiago de Surco.
- c) Comparar el desempeño de la red neuronal multicapa Backpropagation y el de la red neuronal Radial Basis Function para determinar que topología ofrece un flujo de personas más eficiente en el cruce de las avenidas Alfredo Benavides y Caminos del Inca, en el distrito de Santiago de Surco.

### 1.3. Importancia y justificación

#### 1.3.1. Importancia

Los semáforos "inteligentes" colocados en las intersecciones de las principales avenidas de nuestra ciudad son únicamente sincronizados, no son una respuesta a lo que la actual vialidad limeña demanda. Se propone el desarrollo e implementación de un sistema computacional basado en redes neuronales artificiales que aborde la gestión de la vía en función de la demanda que permita racionalizar y optimizar el uso de la vía pública, el tiempo de viaje, los tiempos de espera y, por consiguiente, reducir el costo por inactividad, las pérdidas por gastos en combustible, la contaminación ambiental, la polución y los daños al medio ambiente y, así, elevar la calidad de vida de los ciudadanos. Aunado a estos, se disminuiría dramáticamente el estrés producido por la congestión y las colisiones y accidentes producto de ello.

De otro lado, permitiría mapear la actuación de los diferentes actores del tránsito en tiempo real y adoptar estrategias de optimización en otros ámbitos (infraestructura, seguridad, medio ambiente, etc.)

Finalmente, se pondría al servicio de la comunidad una gestión óptima del transporte, garantizando la seguridad de los conductores y transeúntes.

#### 1.3.2. Justificación

Se requiere incorporar las herramientas tecnológicas para una mejor gestión del tránsito en la capital y, de este modo, implementar un sistema cuya respuesta se adapte a las necesidades particulares de la vía, con el objetivo de lograr un flujo de personas y vehículos óptimo mejorando, en paralelo, la calidad de vida de los ciudadanos.

### 1.4. Alcances y limitaciones

#### 1.4.1. Alcances

El tiempo que cubre este estudio está enmarcado en el periodo mayo 2019 – octubre 2019.

#### 1.4.2. Limitaciones

Este trabajo propone un sistema de gestión y control del flujo de personas en la intersección de las avenidas Alfredo Benavides y Caminos del Inca, a través de modelos computacionales basados en dos tipos de redes neuronales: Perceptrón multicapa Backpropagation y Radial Basis Function, los cuales recogen información del estado de la vialidad desde un sistema de monitoreo de flujo en tiempo real, el cual no forma parte de esta investigación y se simula mediante filmaciones; por lo cual, el modelo se evalúa fuera de línea. Dichas filmaciones se tomaron directamente de la vía en horas punta de alta demanda vehicular, se preparó una base de datos a partir de la observación ~~de~~ directa de los seis (6) videos, que fueron capturados entre las horas 7:00 - 8:00 (2), 13:00 – 14:00 (2) y 16:00 – 17:00 (2) de los días 03, 05, 11, 14, 16 y 17 de setiembre, extrayendo de ellos los quince minutos más representativos para obtener el patrón de flujo que nos sirvió de insumo para el entrenamiento de las topologías indicadas.

El periodo de la investigación, acotado entre mayo y octubre del 2019, podría no asegurar una distribución representativa de los resultados para los otros meses del año.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes del estudio de investigación

#### 2.1.1. Antecedentes Nacionales

Stucchi, L (2015), en su artículo, apunta que:

Lima es una típica capital, en el sentido de que centraliza la mayor cantidad de las actividades comerciales, económicas y sociales; (...) Las grandes actividades, comerciales, educativas y de esparcimiento se realizan de forma dispersa entre distritos que no se encuentran cercanos, y muchas veces a través de pequeños bloques desconectados de su entorno (...) estos factores han hecho que la movilización de los limeños se haya convertido en una actividad netamente funcional y utilitaria: queremos llegar lo más pronto posible de un punto a otro y consumiendo la menor cantidad de recursos. Evadiendo, si fuese necesario, algunas normas básicas de seguridad y comodidad. Pero ninguno de los dos objetivos se cumple actualmente, porque se han buscado a partir de una concepción de ciudad que prioriza la individualidad. Porque en lugar de asumir centralizadamente la planificación en el consenso de sus autoridades, con el soporte de los colegios profesionales competentes, la ciudad ha delegado el control y la planificación a los pequeños feudos de vecinos, propietarios y aquellos gobiernos municipales dinásticos que se han asentado a veces por una década al mando de un ayuntamiento. (pp.2,3)

Espíritu, N (2013), en su tesis, sobre el impacto en la salud debida a la congestión vehicular concluye:

El tráfico intenso en la ciudad de Lima está ocasionando enfermedades físicas y mentales por el estrés que genera el excesivo tiempo demandado para transportarse a los centros de trabajo o estudio, sumado a un mayor gasto económico para la población en el rubro de transporte terrestre dentro de Lima. (...) se deben aplicar soluciones para tratar el problema del tráfico intenso del transporte terrestre en la ciudad de Lima. (...) Existe una responsabilidad política sobre el problema de tráfico intenso del transporte en Lima, que debe ser asumida por los Poderes del Estado (Ejecutivo, Legislativo y Judicial), para

que realmente cumplan con su rol de velar por el bien común, que es una de las finalidades del estado. (pp.15-16)

Daniel Barrenechea (2013), en su artículo, respecto a la situación del tránsito propone:

Educación y fortalecimiento de capacidades de planificación, gestión, monitoreo y evaluación de proyectos y programas para lograr una alta eficiencia en todos los niveles de gobierno, instituciones y entidades privadas, y fortalecer el liderazgo técnico en el sector.

Se recomienda la creación de proyectos colaborativos intersectoriales entre universidades y entidades públicas con el fin de maximizar el aprovechamiento de los recursos humanos y financieros. (p.20).

#### 2.1.2. Antecedentes Internacionales

Bull, A. (2003) señala:

“La congestión de tránsito ha ido en aumento (...) se traduce en incrementos de tiempos de viaje, de consumo de combustibles, de otros costos de operación y de polución atmosférica, con respecto a un flujo vehicular libre.” (p.13)

“(...) Además, reciben perjuicios todos los habitantes de las urbes, en términos de deterioro de su calidad de vida en aspectos tales como mayor contaminación acústica y atmosférica, impacto negativo sobre la salud y sostenibilidad de las ciudades a largo plazo, todo lo cual hace necesario mantener la congestión bajo control.” (p.14)

“(...) Tiempos de viaje, consumos de combustibles y contaminación exagerados pueden anular la sinergia proveniente de la concentración de servicios y oportunidades ofrecidas por las ciudades.” (p.21)

Emad Abdul Kareem et al. (2014), concluye:

Mediante el uso de redes neuronales (...) se reconocerá todos los casos de la calle después de algunas iteraciones, basándose en el hecho de que cada intersección tiene sus propias causas, que se repiten todos los días, por lo que el controlador se adaptará rápidamente a su entorno. La técnica propuesta se ha aplicado y probado en dos intersecciones reales. El controlador inteligente propuesto demostró su eficiencia.

Finalmente, el controlador inteligente propuesto se ha comparado con el controlador actual, que utilizó en estas dos intersecciones. Estas comparaciones indican que la velocidad de los vehículos que salen de las calles de la intersección es mayor que el controlador actual, lo que a su vez disminuye la longitud de la cola de los automóviles. (p.15)

Maldonado, M (2006), en su tesis concluye:

(...) es perfectamente escalable, susceptible de ser mejorado con nuevas y mejores técnicas de procesamiento de imágenes. Así como capaz de introducir la capacidad de identificar la distribución direccional. (...) Los resultados obtenidos por el sistema implican que, aún en caso de traslape entre clases, es posible esperar un desempeño competitivo de las RNAs como clasificadores no lineales en el problema de clasificación vehicular presentado. Por otra parte, los resultados obtenidos por la metodología presentada demuestran la viabilidad de alcanzar niveles aceptables de clasificación aun cuando la RNA es entrenada con una cantidad limitada de patrones.” (p.103)

## 2.2. Bases teóricas relacionadas con el tema

### 2.2.1. Flujo de personas en transporte motorizado

De acuerdo a Thomson, I. et al., 2001, la congestión es inversamente proporcional a la velocidad de circulación,

(...) hasta un cierto nivel de tránsito, los vehículos pueden circular a una velocidad relativamente libre, determinada por los límites de velocidad, la frecuencia de las intersecciones, etc. (...) A medida que aumenta el tránsito, se reducen cada vez más fuertemente las velocidades de circulación. (..) Entonces, una posible definición objetiva sería: la congestión es la condición que prevalece si la introducción de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta el tiempo de circulación de los demás.” (p.8)

Esta relación se muestra en la Figura N° 1.

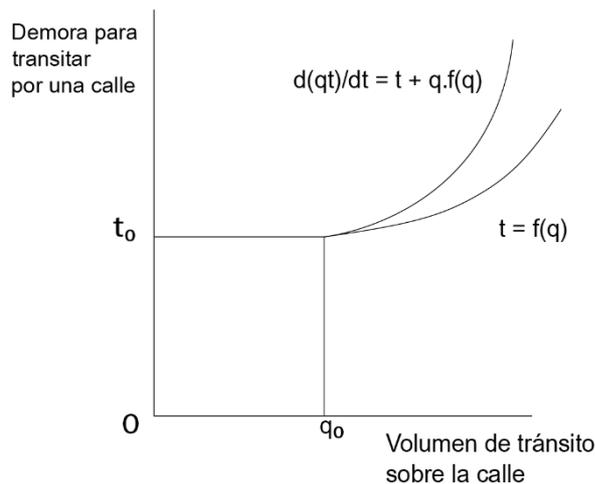


Figura N° 2 Representación esquemática del concepto de la congestión de tránsito.  
Fuente : Thomson, I et al. (2001). Pag.8.

### 2.2.2. Redes neuronales: Nueva aproximación a la resolución de problemas

Se suele afirmar que las redes neuronales presentan una nueva perspectiva en la resolución de problemas, que involucra computación paralela, memoria distribuida y adaptabilidad.

“Kohonen (1998) plantea que las redes neuronales artificiales son redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples, usualmente adaptativos y con una organización jerárquica” como se cita en Acevedo, E. et al. (2017, p.349), simulando la organización del cerebro y el funcionamiento de la neurona biológica.

Acevedo, E. et al. (2017) proponen que "una red neuronal (artificial) se puede definir como un sistema que permite establecer una relación entre entradas y salidas inspiradas en el sistema nervioso, (...) en donde se procesa la información en paralelo, con la posibilidad de aprender y generalizar situaciones no incluidas en procesos de entrenamiento". (p.349)

“Muchos problemas del mundo real pueden interpretarse desde el punto de vista de la estimación o aproximación funcional, en el sentido de tratar de encontrar la función que a partir de un conjunto de entradas proporciona la salida deseada.” (Martín de Brío, B. y Sanz Molina, A., 2001, p.41)

"En las redes neuronales biológicas, la información se almacena en los puntos de contacto entre diferentes neuronas en el cerebro, es lo que normalmente se conoce como sinapsis (...) La sinapsis se ha tratado de llevar a la forma artificial (...) con el objetivo que (...) aprendan tácticas y soluciones basadas en ejemplos de comportamiento típico de patrones. Estos sistemas artificiales no necesitan de una programación previa, teniendo la capacidad de generalizar y aprender de la experiencia." (Acevedo, E. et al., 2017, p.349)

Definimos, entonces, el "aprendizaje" de la red como el proceso de modificación de los pesos sinápticos en las interconexiones en función a una particular relación entrada-salida de un sistema concreto. Una red neuronal artificial posee capacidades de generalizar, aprender y abstraer, tal cual lo hace su símil biológica, y, ya entrenada, es muy superior a su par biológico en realizar tareas complejas como hacer predicciones, tomar decisiones, clasificar, reconocer patrones ocultos en información aleatoria, de forma mucho más rápida y eficiente, siendo un aproximador universal y una herramienta muy poderosa por ello.

La habilidad de las redes neuronales Backpropagation y Radial Basis Function de reconocer y clasificar patrones resulta conveniente para el desarrollo de una aplicación que apunta a controlar el flujo vehicular: se busca exponer caracterizaciones volumétricas de la vía (muestras), lo más fiel posible, a ambas redes como insumo para el entrenamiento de las mismas, aprovechando la propiedad adaptativa de las redes y, debido a su capacidad de proceso masivo y paralelo de información, disponer de respuestas a situaciones particulares en nuestras pistas.

### 2.2.3. Red Neuronal Multicapa Backpropagation (MLP)

Como se observa en la Figura N° 2, un arreglo de capas en cascada forma una red multicapa donde cada salida de una capa es la entrada de la capa siguiente. La topología típica de esta red muestra una capa de entrada que recibe las señales externas, una capa de salida que presenta la salida de la red y varias capas ocultas con conexiones siempre hacia adelante, donde cada unidad procesadora está interconectada con la capa anterior y con la capa siguiente; también conocida

como red feedforward, este modelo es muy utilizado para interpolar relaciones no lineales entre datos de entrada y salida.

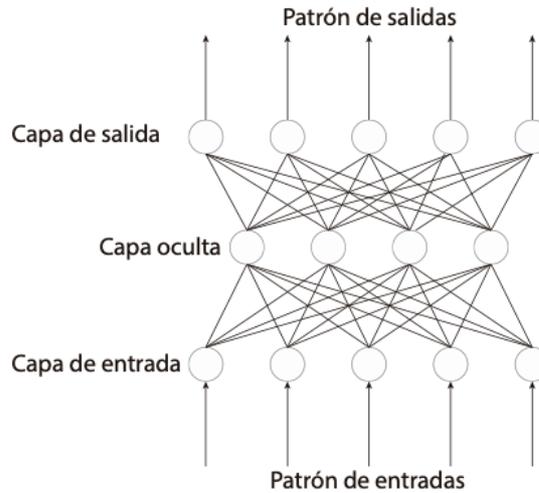


Figura N° 2 Red Backpropagation completamente interconectada.  
Fuente: Basogain, X. (2008) Redes Neuronales Artificiales y sus aplicaciones.

Aprendizaje:

"El objetivo del entrenamiento de una red neuronal artificial es conseguir que una aplicación determinada, para un conjunto de entradas produzca un conjunto de salidas deseadas o mínimamente consistentes. El proceso de entrenamiento consiste en la aplicación secuencial de diferentes conjuntos o vectores de entrada para que se ajusten los pesos de las interconexiones según un procedimiento predeterminado. (...) Durante la sesión de entrenamiento los pesos convergen gradualmente hacia los valores que hacen que cada entrada produzca el vector de salida deseado." (Basogain, 2008, p.17). A continuación, se muestran dos funciones de activación típicas en una red neuronal Backpropagation.

**Funciones sigmoideas de activación:**

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \dots(1)$$

Ecuación N° 1: Función sigmoideal

$$f(x) = \frac{1-e^{-x}}{1+e^{-x}} \dots(2)$$

Ecuación N° 2: Función tangente hiperbólica

En la figura N° 3 se muestra una comparativa entre estas funciones.

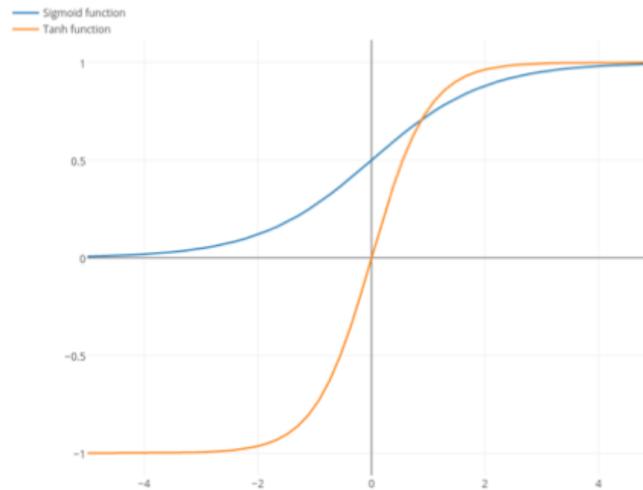


Figura N° 3 Comparativa de funciones de transferencia sigmoidea y tangente hiperbólica.  
Fuente : Thomson, I et al. (2001). Pag.8.

#### 2.2.4. Red neuronal Radial Basis Function (RBF)

La red neuronal Radial Basis Function (Martín de Brío, B. y Sanz Molina, A., 2,001) es “(...) una red unidireccional, del tipo híbrido que puede (...) incorporar aprendizaje supervisado y no supervisado, utilizada para resolver problemas de aproximación, clasificación y predicción”. (p.152)

Como se observa en la Figura 4, los nodos de la capa de entrada reciben las señales del exterior las cuales se transmiten directamente, sin pre procesamiento alguno, a la capa oculta. En esta capa oculta se les aplica una transformación no lineal, a las señales de entrada. El carácter local es el resultado del uso de función gaussiana en cada nodo. Cada elemento de procesamiento representa una clase con un centro y una desviación de la Radial Basis Function asociada a dicho elemento. Finalmente, en la capa de salida se presenta, como salida de la red, la combinación lineal del producto de las activaciones de la capa oculta y el peso sináptico correspondiente.

Entre sus características principales encontramos que son conexiones feedforward, similares a la multicapa Backpropagation con una única capa oculta; además de la capa oculta cuenta con dos capas adicionales, una capa de entrada que se encarga de transmitir las señales de entrada a la capa oculta y otra de salida que se encarga de realizar las combinaciones lineales de las activaciones de la capa oculta; estas combinaciones engloban al rango de

operación de la aplicación, hiperesferas o hiperelipses que dividen el espacio de entrada.

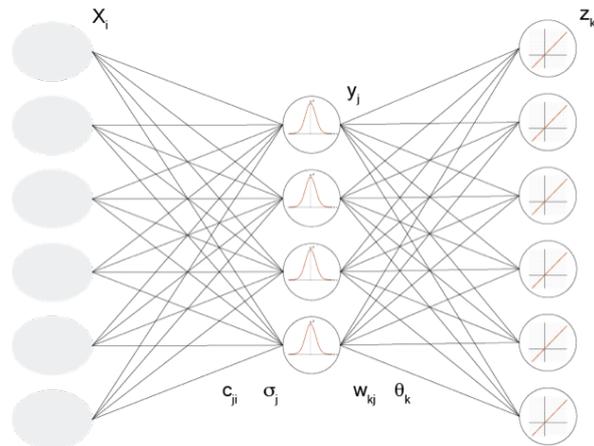


Figura N° 4 Red neuronal Radial Basis Function.  
Fuente: Thomson, I et al. (2001). Pag.8.

Aprendizaje. Este modelo de aprendizaje donde se combina una fase no supervisada y otra supervisada nos ofrece un tipo de red híbrida.

Fase no supervisada - Determinar el valor del centroide: En este caso utilizaremos el algoritmo de k-medias.

- a. Se inicializa proponiendo  $k$  centroides  $c_j$  aleatoriamente,
- b. se calcula la distancia de los patrones  $x$  en cada uno de los  $k$  nodos, agrupando los patrones a la neurona más cercana,
- c. se calculan nuevos centroides de acuerdo al número de nodos,
- d. se determina la nueva distancia de los patrones al nuevo centroide,
- e. se reagrupan de acuerdo a la nueva distancia, el proceso se repite hasta que se estabilizan los centroides.
- f. se calcula el valor de  $\sigma_j$ , usando criterios heurísticos. Con ello finaliza el entrenamiento de los nodos gaussianos.

Fase supervisada: Correspondiente al entrenamiento de las neuronas de salida. Con las neuronas de Radial Basis Function fijas, se obtienen las salidas de las capas ocultas:  $\phi(r_j)$ . Los valores de los pesos sinápticos  $w_{kj}$  y umbrales  $\theta_k$  se calculan entrenando cada perceptrón simple mediante el algoritmo LMS:

$$z_k = \sum_j w_{kj} \phi(r_j) + \theta_k \dots (3)$$

Ecuación N° 3: Algoritmo LMS

Función de activación: de acuerdo a Martín de Brío, B. y Sanz Molina, A. (2,001), "(...) procede precisamente de la simetría radial de estas funciones (el nodo da una salida idéntica para aquellos patrones que distan lo mismo del centroide) (...) el parámetro de normalización  $\sigma$  (o factor de escala) mide la anchura de la gaussiana (...)" (pp.153-154). Esta función de activación se grafica en la Figura N° 5.

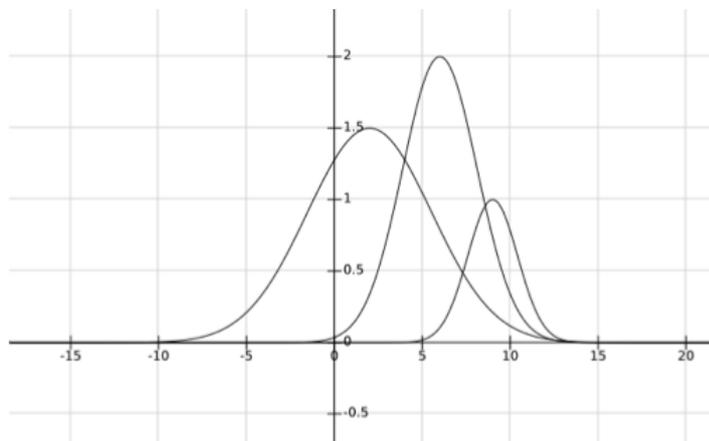


Figura N° 5 Función Gaussiana.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.3. Variables de Estudio

En cuanto a las variables de estudio empleadas en función al tipo de investigación correlacional desarrollada, se tiene:

a) Variable Independiente: Redes neuronales artificiales.

Indicadores: - Cálculo del error cuadrático medio.

b) Variable Dependiente: Flujo de personas.

Indicadores: - Cantidad de vehículos  
- Cantidad de personas por vehículo  
- Tiempo de ciclo semafórico

## 2.4. Tipo y método de investigación

### 2.4.1. Tipo de investigación

De acuerdo a los propósitos de la investigación a realizar definimos la actual como Investigación Tecnológica, ya que “(...) responde a problemas técnicos, aprovechando el conocimiento teórico científico producto de la investigación básica” (Huamaní, P., 2016, pp. 5-6)

### 2.4.2. Método de investigación

El método de investigación fue del tipo empírico y experimental. Por empírica, definimos a la observación que se realizó en la intersección de las avenidas Caminos del Inca y Alfredo Benavides. Por experimental, definimos la gestión de variables dependientes (flujo de personas) a través de variables independientes (redes neuronales)

### 2.4.3. Diseño de investigación

El diseño específico de la investigación fue del tipo experimental verdadero. Manipulación del flujo de personas en función del tipo de vehículo a través del dispositivo de control – semáforo (Ramón G., 2013, p. 4).

## 2.5. Instrumento de recolección de datos

Se utilizaron cámaras de video para registrar la situación en campo. Se observó las condiciones y conductas de la vialidad.

Asimismo, estos registros fueron tratados a través de software manejo de base de datos, MS Access y Excel, para poder ser presentados adecuados al requerimiento de la herramienta de entrenamiento de las redes neuronales.

## 2.6. Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos se obtuvo mediante las siguientes actividades:

- a. Revisión de bibliografía referida a las variables involucradas.
- b. Filmaciones de actividad en intersección de avenidas Alfredo Benavides y Caminos del Inca.
- c. Conteo de vehículos a partir de dicho registro audiovisual y ordenación de acuerdo a diferentes tipos de unidades automotrices.

- d. Ingreso a aplicación Visual Basic Studio y MS Access para simulación de gestión y control del flujo de personas que se desplazan utilizando transporte motorizado a través del dispositivo de control de vehículos.
- e. Transferencia y acondicionamiento de tablas MS Access a Hojas de cálculo Excel para su ingreso al software Matlab.

### CAPÍTULO III: DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

En el ciclo semafórico actual los cambios de fases se programan en función al tiempo transcurrido, tal como se indica en la Figura N° 6.

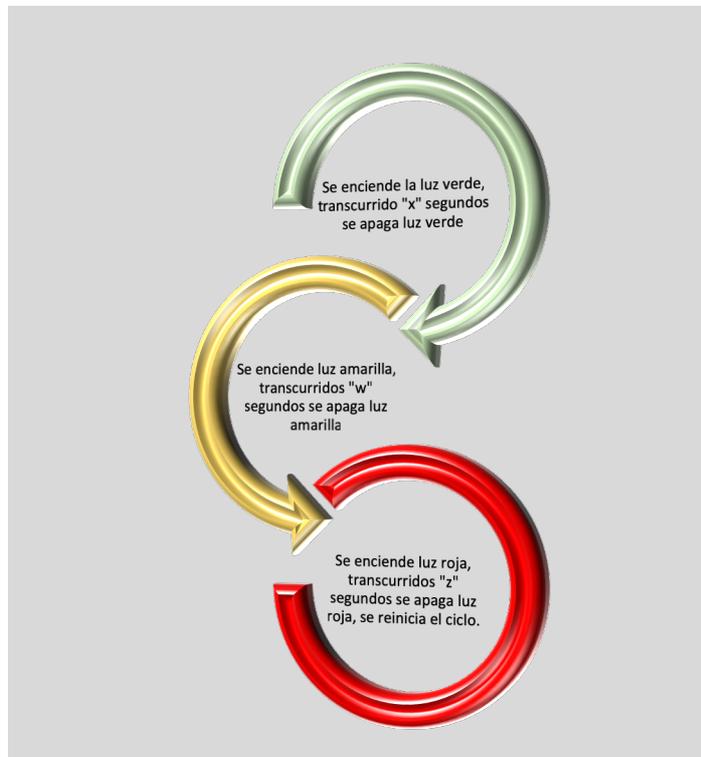


Figura N° 6 Ciclo semafórico actual.  
Fuente: Elaboración propia.

Por lo cual, este trabajo propuso identificar las fluctuaciones de tránsito a lo largo del día y gestionar el ciclo semafórico de la intersección en función de la demanda vial, en tiempo real.

El modelo que se propuso contiene dos módulos independientes de acuerdo a la Figura N° 7:

- una pasiva, correspondiente a un sistema de monitoreo de cámaras y sensores, que permite determinar el flujo vehicular en cada vialidad y
- otra activa, que controla los dispositivos de control -semáforos- cuyo ciclo semafórico actúa no según un tiempo predeterminado sino en función del reconocimiento del patrón de flujo de personas.



Figura N° 7 Tecnologías requeridas por el sistema.  
Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo del módulo de monitoreo no está comprendido en el presente estudio. Sin embargo, se simuló la recolección de datos con filmaciones de la intersección propuesta.

El desarrollo de la aplicación sigue el esquema mostrado en la Figura N° 8.



Figura N° 8 Fases del desarrollo de la aplicación.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.1. Grabación de video

Dadas las dimensiones del presente trabajo, se acotó su realización a una única intersección, en este caso el cruce de las avenidas Benavides y Caminos del Inca del distrito de Santiago de Surco. Se simuló la infraestructura requerida con video cámaras apuntando a la fuente del flujo: los puntos marcados con una cámara, como se aprecia en la Figura N° 9.

- a) Hacia el norte por la avenida Caminos del Inca, con dirección a la avenida Primavera.
- b) Hacia el sur por la avenida Caminos del Inca, con dirección a la avenida Tomas Marsano.
- c) Hacia el oeste por la avenida Alfredo Benavides, con dirección al óvalo de Higuiereta, y
- d) Hacia el este por la avenida Alfredo Benavides, con dirección a la Carretera Panamericana.

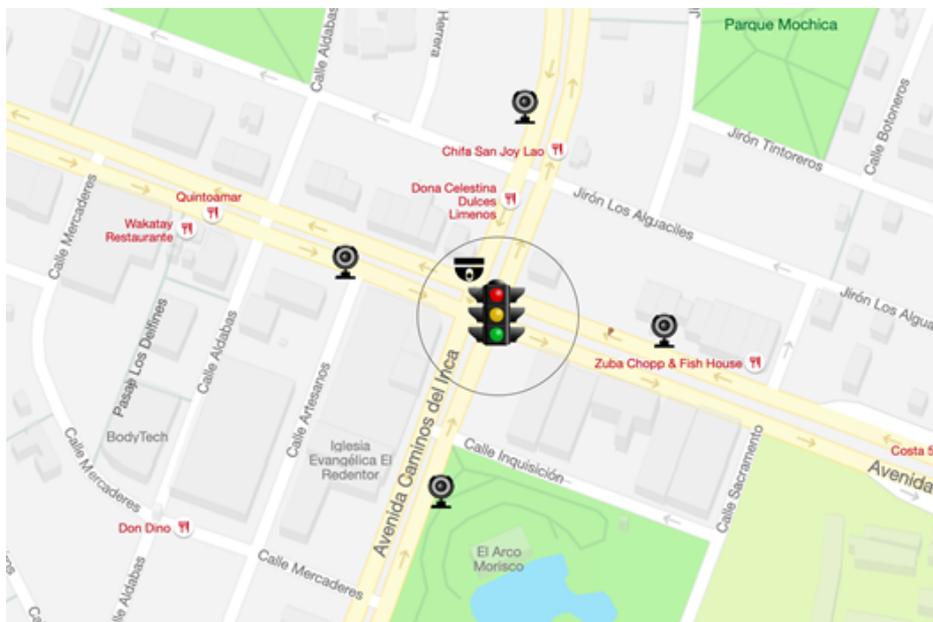


Figura N° 9 Puntos de filmación de flujo de vehículos.  
Fuente: Elaboración propia.

La información obtenida a partir de esta infraestructura sirvió de insumo para el entrenamiento y testeo de la red neuronal.

Teniendo en cuenta que de acuerdo al Reglamento Nacional de Tránsito según:

Artículo 164.- Límites máximos de velocidad especiales.

Límites máximos especiales:

(...) c. En la proximidad de establecimientos escolares, deportivos y de gran afluencia de personas, durante el ingreso, su funcionamiento y evacuación, la velocidad precautoria no debe superar a 20 Km/h. (...)

De esta manera, la solución propuesta contempló una ventana de tiempo de quince segundos en adelanto para el reconocimiento del patrón de flujo de personas en transporte motorizado, es decir el sistema de monitoreo se colocó a una distancia de:

$$\frac{20 \text{ km}}{\text{hora}} \times \frac{1000 \text{ metros}}{1 \text{ kilometro}} \times \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ segundos}} \times 15 \text{ segundos} = 83.33 \text{ metros ...}(4)$$

Ecuación N° 4: Cálculo de la distancia de cámaras

En el esfuerzo de conseguir información con el mayor porcentaje de tránsito diario, se realizaron las filmaciones durante aquellos días de la semana con mayor de afluencia vehicular (máxima demanda vehicular y máxima intensidad de circulación peatonal).

Dichas fechas y horas se muestran en la Tabla N° 1:

Tabla N° 1: Fecha y duración de videos.

HORARIO	FECHA	Duración de video
13:00 – 14:00	martes, 3 de Setiembre de 2019	60'
13:00 – 14:00	jueves, 5 de Setiembre de 2019	60'
17:00 – 18:00	miércoles, 11 de Setiembre de 2019	60'
09:00 – 10:00	sábado, 14 de Setiembre de 2019	60'
07:00 – 08:00	lunes, 16 de Setiembre de 2019	60'
08:00 – 09:00	martes, 17 de Setiembre de 2019	60'

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Transcripción de valores recogidos

De los registros audiovisuales obtenidos se extrajo aproximadamente quince minutos de video representativos de cada día, de acuerdo a la Tabla N° 2.

Tabla N° 2: Selección de videos.

FECHA	Duración de video	Hora de inicio	Hora de fin
martes, 3 de Setiembre de 2019	15'	13:15:00	13:30:00
jueves, 5 de Setiembre de 2019	15'	13:37:00	13:52:00
miércoles, 11 de Setiembre de 2019	15'	17:00:00	17:15:00
sábado, 14 de Setiembre de 2019	15'	09:00:00	09:15:00
lunes, 16 de Setiembre de 2019	15'	07:15:00	07:30:00
martes, 17 de Setiembre de 2019	15'	08:00:00	08:15:00

Fuente: Elaboración propia.

La cantidad total de segundos a visualizar viene dada por la ecuación N° 5:

$$6 \text{ días} \times \frac{15 \text{ minutos}}{\text{día}} \times \frac{60 \text{ segundos}}{\text{minutos}} = 5400 \text{ segundos} \dots(5)$$

Ecuación N° 5: Cálculo de la cantidad de segundos

De esta muestra representativa se contabilizó la cantidad de vehículos.

El total de vehículos se dividió en dos conjuntos dados por cada vialidad, Alfredo Benavides y Caminos del Inca. Estos a su vez se agruparon según tipo de vehículo (carro particular, transporte público, vehículo de carga y motocicleta). Se le asignó un factor a cada tipo de vehículo en función de la cantidad de personas que transporta, como se aprecia en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3: Tipos de vehículos y factor por cantidad de pasajeros.

	Carro Particular	Transporte Público	Vehículo de carga	Motocicleta
				
TIPO DE VEHÍCULO	Automóvil Station Wagon Camioneta Pick Up	Camioneta rural Microbus Omnibus	Camión Remolcador	Motocicleta
FACTOR	x 1.2	x 20	x 2	x 1.1

Fuente: Elaboración propia.

Dicha información se volcó a un formato de tipo tabla, diseñada para ese propósito, como se muestra en la Figura N° 10:

FECHA:						FECHA:					
CAMINOS DEL INCA						ALFREDO BENAVIDES					
	CP	TP	VC	MT	PT		CP	TP	VC	MT	PT
13:10:00	1	1	1	1	1	13:10:00	1	1	1	1	1
13:10:01	0	0	0	0	1	13:10:01	1	0	0	0	0
13:10:02	2	2	2	2	2	13:10:02	2	4	4	2	2
13:10:03	0	0	0	0	0	13:10:03	0	0	0	0	0
13:10:04	1	1	1	1	1	13:10:04	1	1	4	4	4
13:10:05	3	0	3	1	3	13:10:05	3	0	3	1	3
13:10:06	2	2	2	1	2	13:10:06	2	2	5	1	6
13:10:07	0	0	8	0	0	13:10:07	0	0	5	0	6
13:10:08	0	0	8	0	0	13:10:08	0	0	5	0	6
13:10:09	4	4	8	4	4	13:10:09	4	4	5	4	6
13:10:10	0	0	8	0	0	13:10:10	0	0	5	0	6
13:10:11	0	0	8	0	0	13:10:11	0	0	5	0	6
13:10:12	7	7	8	7	7	13:10:12	7	7	5	7	6
13:10:13	1	1	8	1	1	13:10:13	1	1	5	1	6
13:10:14	0	0	0	0	0	13:10:14	0	0	5	0	6
13:10:15	2	4	2	2	2	13:10:15	2	2	2	2	6
13:10:16	0	4	0	0	0	13:10:16	0	0	0	0	6
13:10:17	1	4	1	1	1	13:10:17	1	1	1	1	1
13:10:18	3	4	3	1	3	13:10:18	3	0	3	1	3

Figura N° 10 Formato de ingreso de datos.  
Fuente: Elaboración propia.

Con:

CP: Carros particulares

TP: Transporte público

VC: Vehículos de carga

MT: Motocicletas

PT: Peatón

Dado que se registró la llegada de vehículos por cada segundo se obtuvo 5400 registros para la investigación. El 70% de ellos se utilizó para entrenar la red y el otro 30% restante para testear cada arquitectura.

### 3.3. Ingreso a programa simulador de flujo.

Para la simulación del flujo de personas que se desplazan utilizando transporte motorizado se creó una aplicación Windows Forms para Visual Basic de Visual Studio 2017, el cual contenía un formulario para la entrada de datos llamado Ingreso de valores, el que sirvió de interfaz para el ingreso de los valores contenidos en el formato de recojo de datos. El formulario Ingreso de datos se muestra en la Figura N° 11.

Los datos se almacenaron en una base de datos desarrollada en MS Access 2016.

Figura N° 11 Simulación de flujo de personas desarrollado en VB.NET.  
Fuente: Elaboración propia.

### Características de la base de datos MS Access.

Se diseñó la base de datos MS Access de manera que cada registro contenga quince campos.

Cada uno de estos campos representa un segundo de la cantidad de vehículos clasificado por tipo, y se dimensionó para contener en total 12 valores: 10 datos de entrada correspondientes a la cantidad de cada tipo de vehículo que se dirige a la intersección, más 2 datos adicionales que corresponden al ciclo semafórico de ambas vialidades (el tiempo en segundos con ciclo verde), como se muestra en el formulario de la Figura N° 12.

Figura N° 12 Contenido de cada campo.  
Fuente: Elaboración propia.

Para el caso particular de la Figura N° 12, el valor del campo será:

[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 9 0 ]

De esta manera, los quince campos de un registro (fila) de la base de datos representaron una ventana de tiempo de quince segundos continuos de flujo. En la medida que se ingresan los datos el valor anterior va corriendo de campo en campo en la base de datos, tal como se aprecia en la Figura N° 13.

20	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,5	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,5	1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,4	1,0,3	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2	0,0
21	1,0	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,6	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,5	1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,4	1,0,3	0,0
22	1,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0	1,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,6	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,5	1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,4	1,0
23	0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,9	1,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0	1,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,6	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,5	1,0
24	0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,10	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,9	1,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,6	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,5	0,0
25	2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,11	0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,10	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,9	1,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,7	0,0
26	1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,12	2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,11	0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,10	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,9	1,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,8	1,0
27	1,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,13	1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,12	2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,11	0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,10	0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,9	1,0
28	0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,14	1,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,13	1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,12	2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,11	0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,0,0,0,0,10	0,0

Figura N° 13 Evolución de registros de datos.  
Fuente: Elaboración propia.

Pasamos a explicar las funcionalidades de este formulario dividiendolo en tres áreas, cada una de ellas encerrada dentro de una circunferencia. El área de la izquierda de la Figura N° 11, encerrada por circunferencia de color rojo, contiene dos columnas de cajas de texto, cada una de ellas contiene diez de ellas, como se muestra en la Figura N° 14:

Ingreso Caminos del Inca		Salida Caminos del Inca	
Carros Particulares	<input type="text" value="0"/>	Carros Particulares	<input type="text" value="0"/>
Transporte Público	<input type="text" value="0"/>	Transporte Público	<input type="text" value="0"/>
Vehículo de carga	<input type="text" value="0"/>	Vehículo de carga	<input type="text" value="0"/>
Motocicletas	<input type="text" value="0"/>	Motocicletas	<input type="text" value="0"/>
Personas	<input type="text" value="0"/>	Personas	<input type="text" value="0"/>
Ingreso Benavides		Salida Benavides	
Carros Particulares	<input type="text" value="0"/>	Carros Particulares	<input type="text" value="0"/>
Transporte Público	<input type="text" value="0"/>	Transporte Público	<input type="text" value="0"/>
Vehículo de carga	<input type="text" value="0"/>	Vehículo de carga	<input type="text" value="0"/>
Motocicletas	<input type="text" value="0"/>	Motocicletas	<input type="text" value="0"/>
Personas	<input type="text" value="0"/>	Personas	<input type="text" value="0"/>

Figura N° 14 Área del formulario de simulación de ingreso de vehículos.  
Fuente: Elaboración propia.

A través de las cajas de la columna izquierda del área indicada, agrupadas en Ingreso Caminos del Inca e Ingreso Benavides y mostradas en la Figura N° 15, se registraron en la base de datos MS Access, por cada segundo, y utilizando la

información del formato de recojo de datos que había contabilizado la cantidad de vehículos que habían ingresado a la intersección.

Ingreso Caminos del Inca	
Carros Particulares	0
Transporte Público	0
Vehículo de carga	0
Motocicletas	0
Personas	0
Ingreso Benavides	
Carros Particulares	0
Transporte Público	0
Vehículo de carga	0
Motocicletas	0
Personas	0

Figura N° 15 Cuadros de texto para ingreso de número de vehículos por tipo.  
Fuente: Elaboración propia.

Por lo cual, actualizaban la información del estado de la intersección en ambas vialidades dentro del formulario: en la columna *Ingresaron* del área circunscrita con circunferencia azul, en la Figura N° 11, se iban registrando con cada segundo las personas que iban ingresando a la intersección, como se muestra en la Figura N° 16:

Ingresaron	
387	
38	
8	
28	
0	
Ingresaron	
569	
57	
6	
33	
0	

Figura N° 16 Información de cantidad de personas por tipo de vehículo.  
Fuente: Elaboración propia.

Luego, a través de las cajas agrupadas en *Salida Caminos del Inca* y *Salida Benavides*, de la Figura N° 17, se simulaban los datos de salida de los vehículos en la intersección, tomando en cuenta el diseño de la vialidad, el número de vehículos y los tiempos del ciclo de semaforización de cada una de las avenidas, mostradas en la figura N° 18, en la base de datos MS Access:

Salida Caminos del Inca	
Carros Particulares	<input type="text" value="0"/>
Transporte Público	<input type="text" value="0"/>
Vehículo de carga	<input type="text" value="0"/>
Motocicletas	<input type="text" value="0"/>
Personas	<input type="text" value="0"/>
Salida Benavides	
Carros Particulares	<input type="text" value="0"/>
Transporte Público	<input type="text" value="0"/>
Vehículo de carga	<input type="text" value="0"/>
Motocicletas	<input type="text" value="0"/>
Personas	<input type="text" value="0"/>

Figura N° 17 Salida por tipo de vehículo  
Fuente: Elaboración propia.

<input type="text" value="9"/>
<input type="radio"/> Rojo
<input type="radio"/> Ambar
<input checked="" type="radio"/> Verde
<input type="text" value="663"/>
<input checked="" type="radio"/> Rojo
<input type="radio"/> Ambar
<input type="radio"/> Verde
<input type="text" value="0"/>

Figura N° 18 Simulador del control de dispositivos dentro del formulario  
Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, se lograba actualizar la información del estado de la intersección en ambas vialidades dentro del formulario: en la columna *Salieron* se iban

agregando, con cada segundo, la cantidad de personas por tipo de vehículo que iban saliendo, como se muestra en la Figura N° 19:

The image shows a vertical data entry form with two sections, each labeled 'Salieron'. Each section contains five input fields with the following values:

Salieron
363
36
7
26
0

Salieron
546
57
6
32
0

Figura N° 19 Número de personas por tipo de vehículo que salió de la intersección.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 3.4. Acondicionamiento de datos para entrenamiento de red neuronal.

Una vez ingresada toda la información a la base de datos MS Access se exportó a una hoja de cálculo MS Excel, para el tratamiento de los valores obtenidos.

Los quince campos que formaban un registro en MS Access pasaron a convertirse en quince celdas en una fila en MS Excel.



La salida de la red se dimensionó para contener seis variables, correspondiente a la cantidad de luces de los dispositivos de control.

#### 4.1.1 Perceptrón Multicapa

Con esta arquitectura se evaluó tres configuraciones haciendo uso de la Neuronal Network Toolbox del software Matlab 2018b, cada una de ellas con las características indicadas:

##### Primera configuración para RNA Perceptrón Multicapa

- Número de variables de entrada =  $12 \times 15 = 180$ .
- Capas ocultas = 3.
- Neuronas en cada capa oculta respect. = 40, 20, 6 (ver Figura N° 20)
- Número de variables de salida = 6.
- Algoritmo de entrenamiento: Lanverberg-Manquardt Backpropagation.
- Función de Activación neuronas de la capa oculta: LogSig.
- Función de Activación de la capa de salida: Linear Transfer Function.

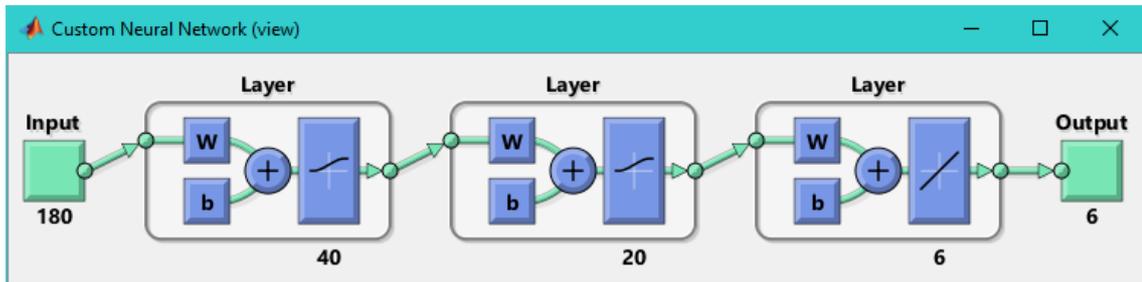


Figura N° 20 Capas ocultas de red neuronal MLP para primer entrenamiento.  
Fuente: Elaboración propia.

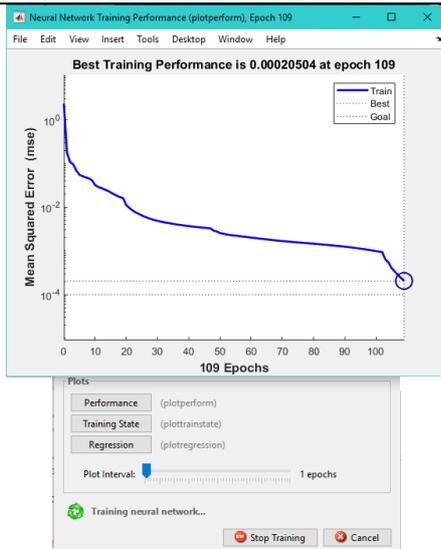
```
red01 = newff( [ zeros(180,1) ones(180,1) ] , [ 40 20 6 ] ,
              { 'logsig' 'logsig' 'purelin' } , 'trainlm' );
              \Configuración de red MLP

red01.trainparam.epochs = 300;

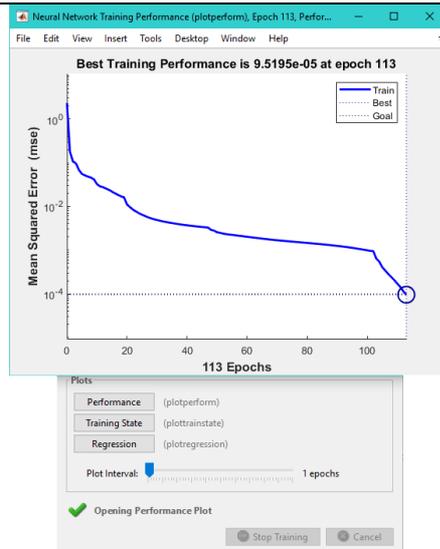
red01.trainparam.goal = 10e-7;

red01 = train( red01 , X , Yd); \Entrenamiento de red MLP
```

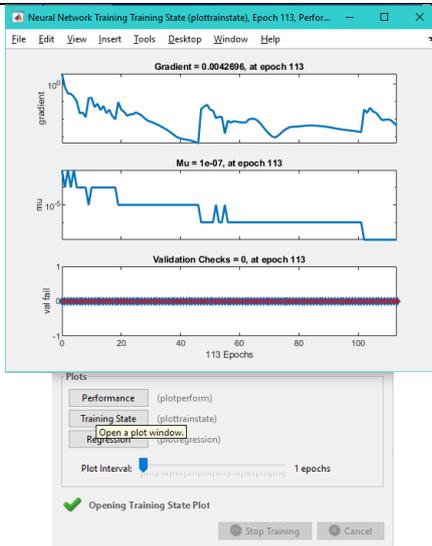
La performance, estado de entrenamiento y regresión durante el entrenamiento de la primera configuración en la Neural Network Tool de Matlab se muestran en la Figura N° 21.



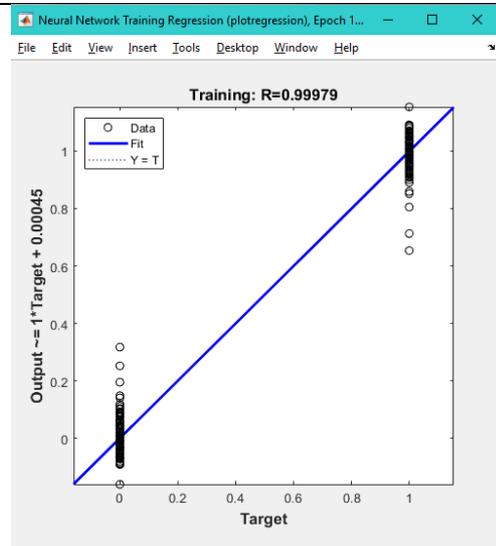
Performance durante iteración 109



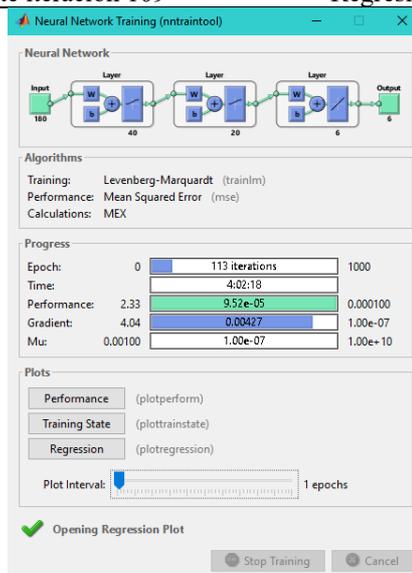
Performance durante iteración 113



Estado entrenamiento durante iteración 109



Regresión durante iteración 113



Resultados alcanzados en iteración 113

Figura N° 21 Respuestas de la RNA MLP durante primer entrenamiento  
Fuente: Elaboración propia.

### Segunda configuración para RNA Perceptrón Multicapa

- Número de variables de entrada =  $12 \times 15 = 180$ .
- Capas ocultas = 3.
- Neuronas en cada capa oculta respect. = 60, 30, 6 (ver Figura N° 22)
- Número de variables de salida = 6.
- Algoritmo de entrenamiento: Lanverberg-Manquardt Backpropagation.
- Función de Activación neuronas de la capa oculta: LogSig.
- Función de Activación de la capa de salida: Linear Transfer Function.

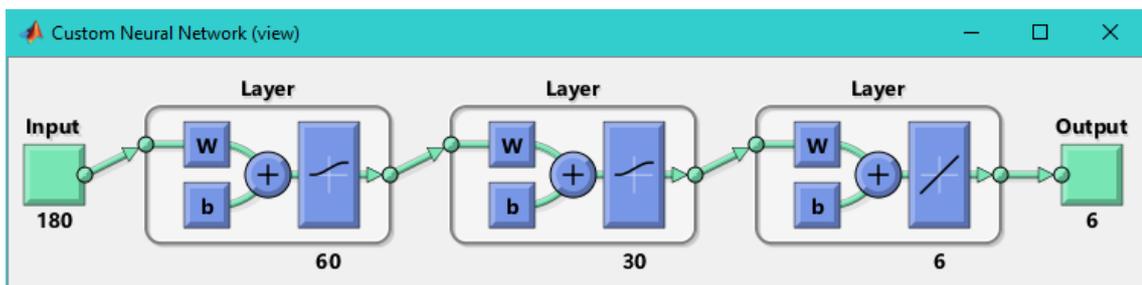


Figura N° 22 Capas ocultas de red neuronal MLP para segundo entrenamiento.  
Fuente: Elaboración propia.

```
red02 = newff( [ zeros(180,1) ones(180,1) ] , [ 60 30 6 ] ,  
              { 'logsig' 'logsig' 'purelin' } , 'trainlm' );  
              `Configuración de red MLP  
  
red02.trainparam.epochs = 300;  
red02.trainparam.goal = 10e-7;  
red02 = train( red02 , X , Yd);    `Entrenamiento de red MLP
```

La performance, estado de entrenamiento y regresión durante el entrenamiento de la segunda configuración en la Neural Network Tool de Matlab se muestran en la Figura N° 23.

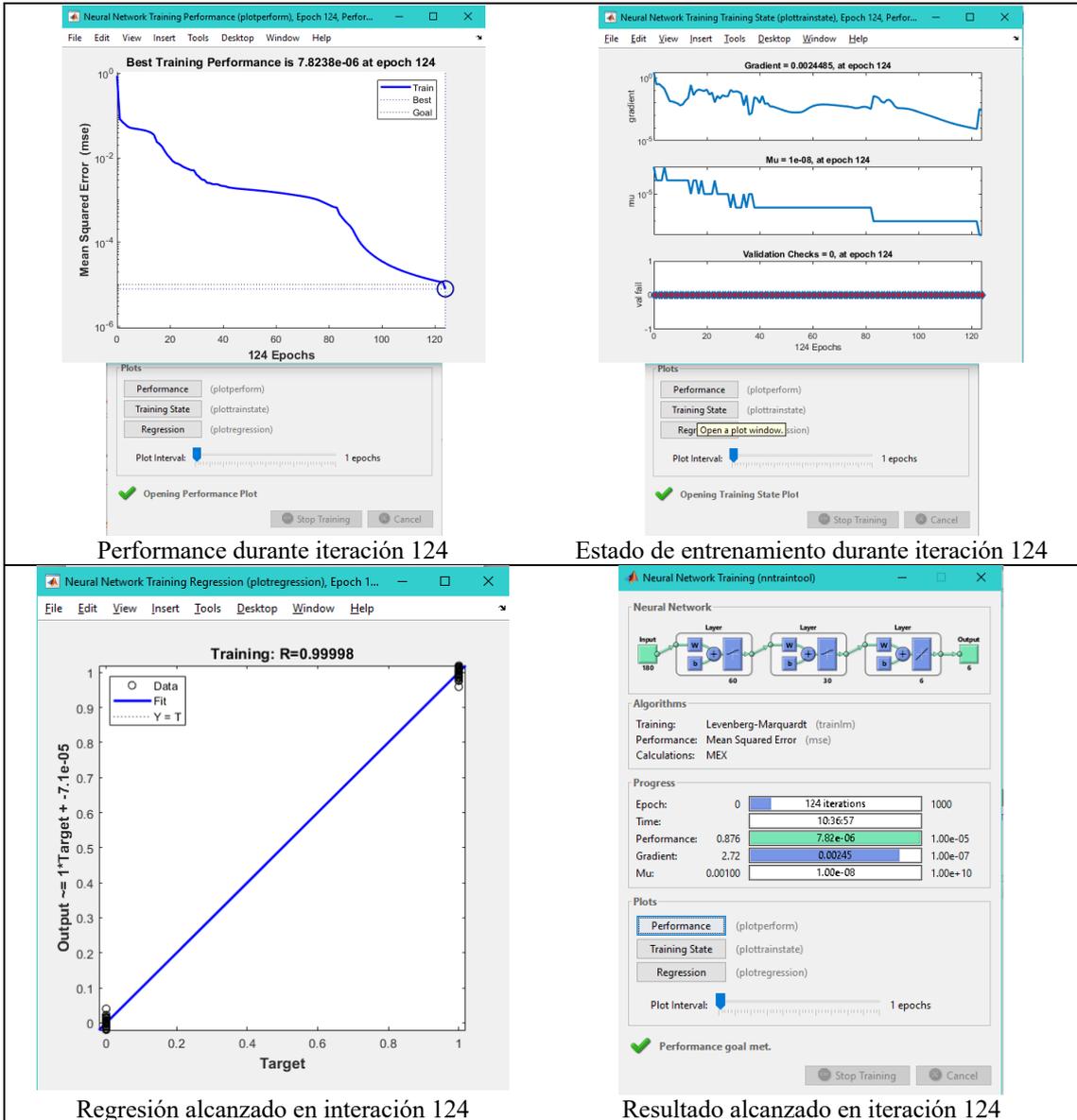


Figura N° 23 Respuestas de RNA MLP durante segundo entrenamiento  
Fuente: Elaboración propia.

### Tercera configuración para RNA Perceptrón Multicapa

- Número de variables de entrada =  $12 \times 15 = 180$ .
- Capas ocultas = 4.
- Neuronas por capa oculta respect. = 100, 50, 20, 6 (ver Figura N° 24)
- Número de variables de salida = 6.
- Algoritmo de entrenamiento: Descenso del gradiente.
- Función de Activación neuronas de la capa oculta: LogSig.
- Función de Activación de la capa de salida: Linear Transfer Function.

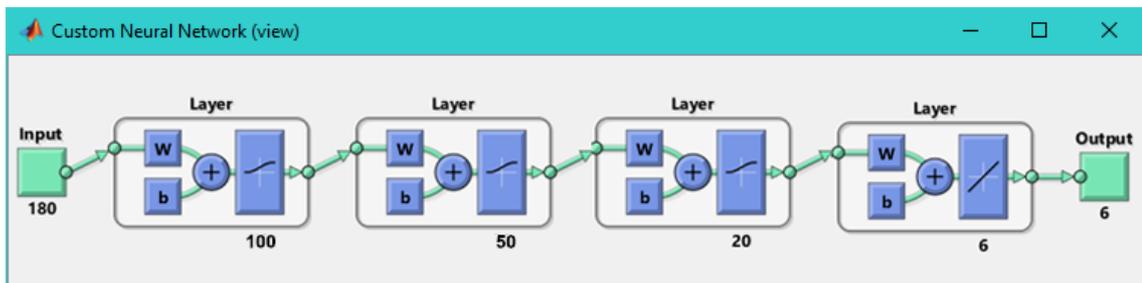
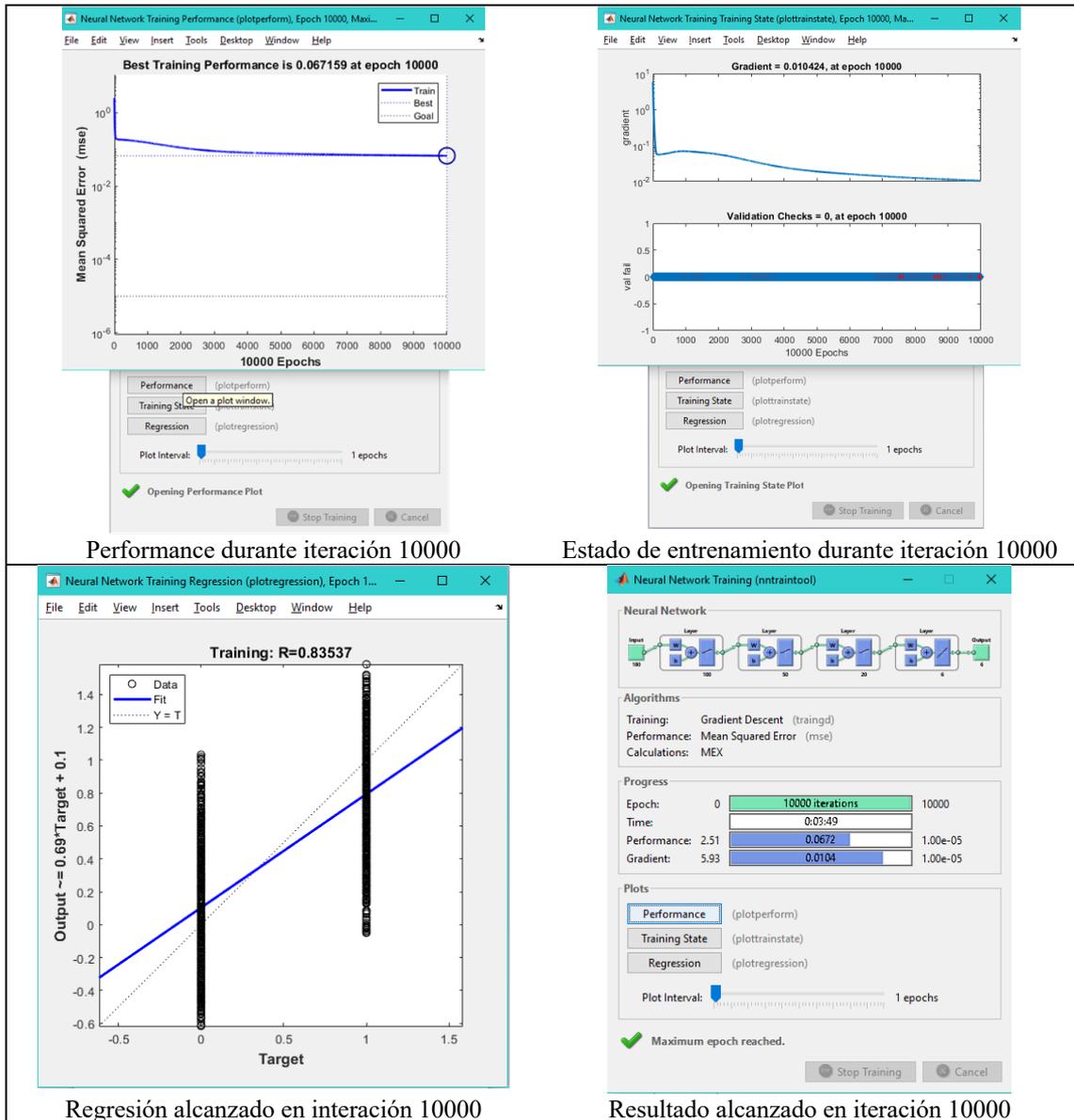


Figura N° 24 Capas ocultas de red neuronal MLP para tercer entrenamiento.  
Fuente: Elaboración propia.

```
red03 = newff( [ zeros(180,1) ones(180,1) ] , [ 100 50 20 6 ] ,  
              { 'logsig' 'logsig' 'logsig' 'purelin' } , 'traingd' );  
              `Configuración de red MLP  
  
red03.trainparam.epochs = 10000;  
red03.trainparam.goal = 10e-7;  
red03 = train( red03 , X , Yd);    `Entrenamiento de red MLP
```

La performance, estado de entrenamiento y regresión durante el entrenamiento de la tercera configuración en la Neural Network Tool de Matlab se muestran en la Figura N° 25.



Performance durante iteración 10000

Estado de entrenamiento durante iteración 10000

Regresión alcanzado en iteración 10000

Resultado alcanzado en iteración 10000

Figura N° 25 Respuestas de RNA MLP durante tercer entrenamiento  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2 Radial Basis Function

Con esta arquitectura se evaluó dos configuraciones haciendo uso de la Neuronal Network Toolbox del software Matlab 2018b:

##### Primera configuración para RNA Radial Basis Function

```
redrbf = newrb( X , Yd );    \Entrenamiento de red RBF
```

La configuración resultante del comando utilizado se muestra en la Figura N° 26.

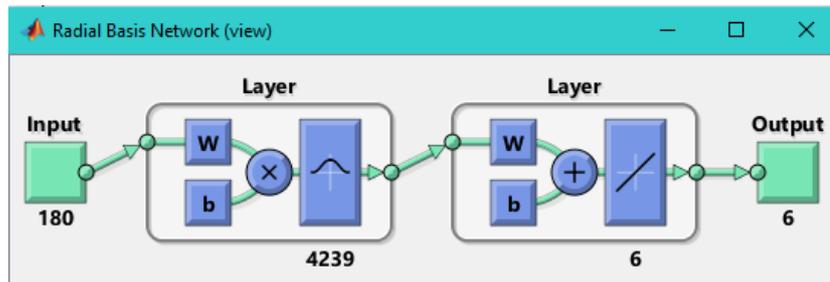


Figura N° 26 Configuración de red neuronal RBF para primer entrenamiento.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 27 se muestran los gráficos de la performance obtenida en esta configuración.

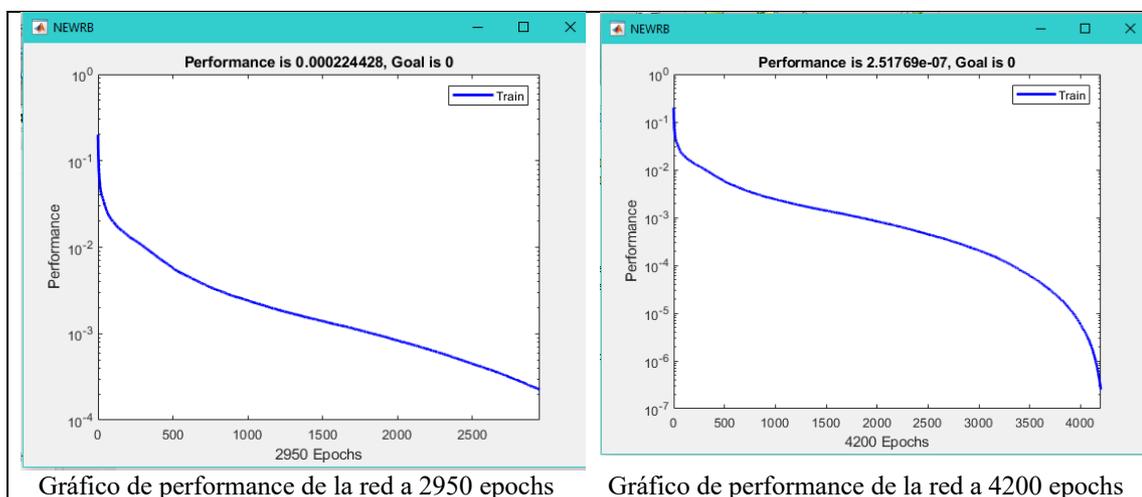


Figura N° 27 Rendimiento durante el entrenamiento de la red RBF.  
Fuente: Elaboración propia.

## Segunda configuración para RNA Radial Basis Function

```
redrbfe = newrbe( X , Yd ); \Entrenamiento de red RBF
```

La configuración resultante del comando para la segunda configuración utilizada se muestra en la Figura N° 28.

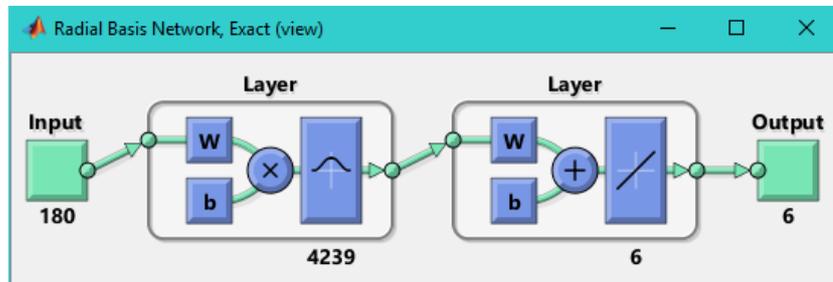


Figura N° 28 Configuración de red neuronal RBF para segundo entrenamiento.  
Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Testeo de la red neuronal utilizando MATLAB.

### 4.2.1 Perceptrón Multicapa

Finalizado el entrenamiento de todas las redes neuronales, se testeó las configuraciones propuestas.

#### Primera configuración para RNA Perceptrón Multicapa

```
Ys01 = sim( red01 , Xne);    `Test de red MLP
```

En la Tabla N° 4 se comparó una muestra de la salida Ys con la salida deseada.

Tabla N° 4: Salida primer entrenamiento de red MLP vs. salida deseada.

	MATRIZ DE SALIDA DE RED MLP						MATRIZ DESEADA					
1	-0.0029	-0.0003	1.0021	1.0017	-0.0016	0.0008	0	0	1	1	0	0
2	0	-0.0025	1.0016	0.9891	0.0053	0.0064	0	0	1	1	0	0
3	0.0004	-0.0018	1.0003	0.9928	0.0073	0.0008	0	0	1	1	0	0
4	0.0001	-0.0023	1.001	0.9914	0.0083	0.0012	0	0	1	1	0	0
5	0.0021	-0.0028	0.9996	0.9874	0.0151	-0.0016	0	0	1	1	0	0
6	-0.0008	-0.0024	1.0018	0.991	0.007	0.0031	0	0	1	1	0	0
7	0.0002	-0.0024	1.0007	0.9977	0.0023	0.0011	0	0	1	1	0	0
8	-0.0018	-0.0023	1.0022	0.9954	0.0006	0.0053	0	0	1	1	0	0
9	-0.0022	-0.002	1.0023	0.9955	0.0002	0.0057	0	0	1	1	0	0
10	-0.0014	-0.0024	1.0018	0.9846	0.0127	0.004	0	0	1	1	0	0
11	-0.0022	0.0026	0.9977	0.0082	0.9928	-0.0001	0	0	1	0	1	0
12	0.0001	0.0005	0.9975	0.0082	0.9935	-0.0007	0	0	1	0	1	0
13	0.0012	0.0003	0.9967	0.0026	1.0018	-0.0034	0	0	1	0	1	0
14	0.0029	-0.0017	0.9974	0.0117	0.9928	-0.0037	0	0	1	0	1	0
15	0.0044	-0.0034	0.9971	0.0157	0.9866	-0.0012	0	0	1	0	1	0
16	0.0062	-0.0035	0.9956	0.0069	0.9987	-0.0046	0	0	1	0	1	0
17	-0.0003	-0.0024	1.0012	0.0034	1.0003	-0.0028	0	0	1	0	1	0
18	0.0008	-0.0035	1.0011	0.0083	0.9951	-0.0023	0	0	1	0	1	0
19	0.0142	-0.0045	0.9885	-0.0061	1.0118	-0.0046	0	0	1	0	1	0
20	-0.0008	-0.003	1.0022	-0.011	1.0126	-0.0005	0	0	1	0	1	0
21	-0.006	-0.0035	1.008	-0.0063	1.0061	0.0012	0	0	1	0	1	0

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtuvo como resultado un error cuadrático medio de 0.0039.

## Segunda configuración para RNA Perceptrón Multicapa

Ys02 = sim( red02 , Xne);    `Test de red MLP

En la Tabla N° 5 se comparó una muestra de la salida Ys con la salida deseada.

Tabla N° 5: Salida segundo entrenamiento de red MLP vs. salida deseada.

	MATRIZ DE SALIDA DE RED RBF SEGUNDO ENTRENAMIENTO						MATRIZ DESEADA					
1	-0.0003	0	1.0003	1.002	-0.002	0	0	0	1	1	0	0
2	-0.0002	0	1.0002	1.0001	-0.0001	0	0	0	1	1	0	0
3	-0.0003	0	1.0003	1.0011	-0.0011	0	0	0	1	1	0	0
4	-0.0002	0	1.0002	1.0033	-0.0034	0.0001	0	0	1	1	0	0
5	-0.0002	0	1.0002	1.0005	-0.0005	0	0	0	1	1	0	0
6	-0.0001	0	1.0002	0.9999	-0.0001	0.0002	0	0	1	1	0	0
7	-0.0001	0	1.0001	0.9978	0.002	0.0001	0	0	1	1	0	0
8	-0.0001	0	1.0001	1.0002	-0.0005	0.0002	0	0	1	1	0	0
9	0	0	1	0.9938	0.006	0.0002	0	0	1	1	0	0
10	-0.0001	0	1.0002	0.9996	0.0001	0.0002	0	0	1	1	0	0
11	0.0001	-0.0001	1	-0.0037	1.0033	0.0004	0	0	1	0	1	0
12	0.0002	0	0.9999	-0.0016	1.0013	0.0003	0	0	1	0	1	0
13	0.0001	0	0.9999	-0.0026	1.0023	0.0003	0	0	1	0	1	0
14	0.0001	0	0.9999	0.0016	0.9981	0.0003	0	0	1	0	1	0
15	0.0002	0	0.9998	0.0003	0.9994	0.0003	0	0	1	0	1	0
16	0.0002	0	0.9997	-0.0017	1.0014	0.0003	0	0	1	0	1	0
17	0	0	0.9999	-0.0018	1.0017	0.0001	0	0	1	0	1	0
18	0	0	1	-0.0008	1.0008	0.0001	0	0	1	0	1	0
19	0.0001	0	0.9999	-0.0006	1.0005	0.0001	0	0	1	0	1	0
20	-0.0002	0	1.0001	-0.0002	1.0003	0	0	0	1	0	1	0
21	-0.0005	-0.0001	1.0005	0.0025	0.9978	-0.0002	0	0	1	0	1	0

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtuvo como resultado un error cuadrático medio de 0.00019.

### Tercera configuración para RNA Perceptrón Multicapa

Ys03 = sim( red03 , Xne); \Test de red MLP

En la Tabla N° 6 se comparó una muestra de la salida Ys con la salida deseada.

Tabla N° 6: Salida tercer entrenamiento de red MLP vs. salida deseada.

	MATRIZ DE SALIDA DE RED RBF TERCER ENTRENAMIENTO						MATRIZ DESEADA					
1	0.2752	0.0336	0.6171	0.4225	0.4601	0.1721	0	0	1	1	0	0
2	0.2523	-0.0064	0.6513	0.4471	0.4734	0.1194	0	0	1	1	0	0
3	0.2728	0.0180	0.6315	0.4239	0.4609	0.1699	0	0	1	1	0	0
4	0.2777	0.0017	0.6248	0.4481	0.4916	0.1614	0	0	1	1	0	0
5	0.2770	-0.0061	0.6278	0.4503	0.5245	0.1307	0	0	1	1	0	0
6	0.3058	0.0016	0.6303	0.4430	0.4980	0.1821	0	0	1	1	0	0
7	0.2604	-0.037	0.6229	0.4520	0.5344	0.1289	0	0	1	1	0	0
8	0.2998	0.0089	0.6274	0.4447	0.5110	0.1775	0	0	1	1	0	0
9	0.2756	-0.0445	0.6209	0.4613	0.5690	0.1309	0	0	1	1	0	0
10	0.2634	-0.0369	0.6288	0.4591	0.5548	0.1497	0	0	1	1	0	0
11	0.2754	-0.0418	0.6196	0.4613	0.5825	0.1457	0	0	1	0	1	0
12	0.2989	-0.0394	0.6082	0.4568	0.5741	0.1794	0	0	1	0	1	0
13	0.3005	-0.0499	0.6176	0.4621	0.5697	0.1589	0	0	1	0	1	0
14	0.2901	-0.0651	0.6111	0.4669	0.6001	0.1728	0	0	1	0	1	0
15	0.3220	-0.0474	0.6008	0.4600	0.5932	0.2146	0	0	1	0	1	0
16	0.3279	-0.0732	0.5958	0.4639	0.6174	0.1958	0	0	1	0	1	0
17	0.3097	-0.081	0.6220	0.4779	0.6184	0.1566	0	0	1	0	1	0
18	0.3069	-0.0757	0.6013	0.4673	0.6285	0.2151	0	0	1	0	1	0
19	0.3217	-0.0671	0.6096	0.4728	0.6289	0.2127	0	0	1	0	1	0
20	0.3312	-0.0804	0.6050	0.4667	0.6440	0.2267	0	0	1	0	1	0
21	0.3356	-0.0874	0.5957	0.4764	0.6659	0.2200	0	0	1	0	1	0

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se obtuvo el peor resultado: un error cuadrático medio de 15.3439.

#### 4.2.2 Radial Basis Function

Finalizado el entrenamiento la red neuronal RBF se testeó las diferentes configuraciones propuestas.

##### Primera configuración para RNA Radial Basis Function

`Yrbf = sim( redrbf , Xne )` \Simulación de red RBF

En la Tabla N° 7 se comparó una muestra de la salida Ys con la salida deseada.

Tabla N° 7: Matriz de salida de primera red RBF testeada vs. salida deseada.

	MATRIZ DE SALIDA DE RED RBF PRIMER ENTRENAMIENTO						MATRIZ DESEADA					
1	0.0141	0.0477	0.9382	0.5732	0.3185	0.1083	0	0	1	1	0	0
2	-0.0519	0.0088	1.0432	1.0306	-0.0336	0.003	0	0	1	1	0	0
3	-0.0807	0.0165	1.0642	0.6532	0.3625	-0.0157	0	0	1	1	0	0
4	-0.1086	0.0814	1.0272	1.0671	-0.1055	0.0384	0	0	1	1	0	0
5	-0.0546	0.0018	1.0528	0.763	0.2683	-0.0313	0	0	1	1	0	0
6	-0.0489	0.0506	0.9983	0.772	0.2003	0.0276	0	0	1	1	0	0
7	-0.0821	0.0147	1.0675	0.5234	0.5208	-0.0442	0	0	1	1	0	0
8	-0.0758	0.0159	1.06	0.2918	0.7684	-0.0602	0	0	1	1	0	0
9	-0.009	0.0366	0.9723	0.7501	0.1999	0.05	0	0	1	1	0	0
10	-0.0402	0.0118	1.0284	1.0934	-0.0525	-0.0409	0	0	1	1	0	0
11	0.0319	-0.027	0.9951	0.3254	0.7183	-0.0437	0	0	1	0	1	0
12	0.0105	-0.012	1.0015	0.3118	0.7481	-0.0599	0	0	1	0	1	0
13	0.0237	-0.0403	1.0166	0.3942	0.6929	-0.0871	0	0	1	0	1	0
14	0.0688	-0.035	0.9662	0.0152	1.0053	-0.0205	0	0	1	0	1	0
15	0.1231	-0.0651	0.9421	0.3067	0.7218	-0.0285	0	0	1	0	1	0
16	0.2018	-0.1074	0.9056	0.2999	0.7273	-0.0273	0	0	1	0	1	0
17	0.0147	-0.0382	1.0235	0.1133	0.9495	-0.0628	0	0	1	0	1	0
18	0.0451	-0.018	0.9728	0.1598	0.7967	0.0435	0	0	1	0	1	0
19	0.0275	0.0092	0.9633	0.3283	0.5885	0.0832	0	0	1	0	1	0
20	-0.0223	0.0319	0.9904	0.3623	0.5822	0.0554	0	0	1	0	1	0
21	-0.0778	0.0089	1.0689	0.3719	0.6737	-0.0457	0	0	1	0	1	0

Fuente: Elaboración propia.

Obteniendo como resultado un error cuadrático medio de 4.57.

## Segunda configuración para RNA Radial Basis Function

`Yrbf = sim( redrbfe , Xne ) `Simulación de red RBF`

En la Tabla N° 8 se comparó una muestra de la salida  $Y_s$  con la salida deseada.

Tabla N° 8: Matriz de salida de segunda red RBF testeada vs. salida deseada

MATRIZ DE SALIDA DE RED RBF SEGUNDO ENTRENAMIENTO						
1	0.0191	-0.0002	0.9811	0.9038	0.0772	0.019
2	0.0482	-0.0006	0.9523	0.7897	0.1626	0.0477
3	0.078	-0.0009	0.9229	0.6631	0.2598	0.0772
4	0.001	0	0.999	0.7431	0.2558	0.001
5	0.0186	-0.0002	0.9816	0.5723	0.4093	0.0185
6	-0.0534	0.0006	1.0527	0.6047	0.4481	-0.0528
7	-0.0421	0.0005	1.0417	0.5046	0.5371	-0.0417
8	-0.0111	0.0001	1.011	0.4188	0.5922	-0.011
9	0.0356	-0.0004	0.9648	0.3843	0.5805	0.0352
10	0.0966	-0.0011	0.9045	0.3471	0.5573	0.0956
11	0.0679	-0.0008	0.9328	0.2946	0.6381	0.0673
12	0.0611	-0.0007	0.9396	0.198	0.7415	0.0604
13	0.022	-0.0003	0.9782	0.1109	0.8673	0.0218
14	0.047	-0.0005	0.9535	0.1096	0.8439	0.0465
15	-0.067	0.0008	1.0662	-0.0221	1.0884	-0.0663
16	-0.1352	0.0016	1.1336	-0.1231	1.2569	-0.1338
17	-0.0912	0.0011	1.0901	-0.1006	1.1909	-0.0903
18	-0.0629	0.0007	1.0622	-0.0701	1.1324	-0.0623
19	-0.0931	0.0011	1.092	-0.1067	1.1988	-0.0922
20	-0.0958	0.0011	1.0947	-0.1176	1.2124	-0.0949
21	0.0358	-0.0004	0.9646	0.0399	0.9247	0.0354

MATRIZ DESEADA					
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0

Fuente: Elaboración propia.

Obteniendo como resultado un error cuadrático medio de 4.712, bastante similar a la otra configuración.

Comparando ambos resultados, se determina que la RNA Perceptrón multicapa ofrece un error menor por lo que se presenta como mejor opción para una posible implementación real de este estudio.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones correspondientes a esta investigación podemos resumirlas a:

- 1) Se utilizó el Neural Network Toolbox del Matlab para diseñar, entrenar y evaluar la red neuronal Perceptron Multicapa. Para esto, se emplearon los siguientes comandos: `newff()` para establecer la estructura de la RNA MLP, el comando `train()` para entrenamiento de la RNA MLP y el comando `sim()` para obtener la salida de la RNA MLP. Esto puede ser apreciado de forma más explícita en las secciones 4.1.1 y 4.2.1.
- 2) Se utilizó el Neural Network Toolbox del Matlab para diseñar, entrenar y evaluar la red neuronal Radial Basis Function. Para esto, se emplearon los siguientes comandos: `newrb()` y `newrbe()` para la creación de las estructuras de la RNA RBF y el comando `sim()` para obtener las salidas de las RNA RBF. Esto puede ser apreciado de forma más explícita en las secciones 4.1.2 y 4.2.2.
- 3) Al comparar el desempeño de ambas redes neuronales propuestas en este trabajo de tesis, se determinó que la red neuronal del tipo Perceptrón multicapa ofreció una mejor respuesta, con la distribución de neuronas de [60, 30, 6] en sus capas ocultas, con un algoritmo de entrenamiento Lanverberg-Manquardt Backpropagation, el cual ofreció un error cuadrático medio de 0.00019, tal como se observa en la sección 4.2.

## RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda el uso de la diferencia entre los flujos de personas de ambas vialidades (Flujo vehicular<sub>camino del inca</sub> – Flujo vehicular<sub>Alfredo Benavides</sub>), como parámetro para una mejor aproximación en el cálculo de cambio semafórico en el sistema utilizado para la simulación de flujo, en lugar del tiempo en verde del ciclo semafórico.
- 2) Asimismo, se aconseja el uso de una ventana de tiempo mayor a los quince segundos utilizados en la programación de simulación de flujo: en este trabajo se acotó a ese tiempo dado el alcance planteado, para posteriores trabajos el uso de una ventana de uno o varios minutos podría ofrecer un mejor resultado.
- 3) En el mismo sentido, el número de registros para entrenamiento y prueba debe aumentar sustancialmente para conseguir una red neuronal con mejor respuesta.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, E. Et al. (2017). *Principios y características de las redes neuronales artificiales*. Universidad Cooperativa de Colombia. Medellín, Colombia. Disponible online: [https://www.researchgate.net/publication/331498946\\_Principios\\_y\\_caracteristicas\\_de\\_las\\_redes\\_neuronales\\_artificiales](https://www.researchgate.net/publication/331498946_Principios_y_caracteristicas_de_las_redes_neuronales_artificiales)
- Bull, A (2003). *Congestión de tránsito – El problema y como enfrentarlo*. Proyecto “Cobro por uso de vías en ciudades de América Latina”, desarrollado por la Unidad de Transporte de la División de Recursos Naturales e Infraestructura de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) Santiago de Chile, Chile. Acceso Setiembre 2019 [Online]. Disponible: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/27813/6/S0301049\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/27813/6/S0301049_es.pdf)
- Basogain, X. (2008), *Redes neuronales y sus aplicaciones* Proyecto OpenCourseWare, Universidad del País Vasco, España. Acceso Julio 2019 (Online) Disponible: [https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/9047/mod\\_resource/content/1/redes\\_neuro/contenidos/pdf/libro-del-curso.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/9047/mod_resource/content/1/redes_neuro/contenidos/pdf/libro-del-curso.pdf)
- Barrenechea, D (2013). *Hacia una ciudad para las personas - Hoja de ruta para una Movilidad y un Transporte Sostenibles en Lima y Callao al 2025*. Fundación Transitemos. Lima, Perú. Disponible online: <https://transitemos.org/publicaciones-3/hacia-una-ciudad-para-las-personas/>
- Espíritu, N (2018). *El transporte y el estrés en la ciudad de Lima* (Tesis de Pregrado). Facultad de Psicología, Universidad Ricardo Palma. Lima, Perú.
- Emad Abdul Kareem et al. (2014). *Intelligent Traffic Light Control Using Neural Network with Multi-Connect Architecture*. Department of Computer Science Education Collage Al-Mustansiriya University, Baghdad, Iraq. Disponible online: <https://www.semanticscholar.org/paper/Intelligent-Traffic-Light-Control-Using-Neural-with-Kareem/b8f58dbf08156b31550a999d11a0a5e28cbe1f0a>
- Huamání, P. (2016) *La investigación tecnológica*. Universidad Ricardo Palma. Lima, Perú. Disponible online: <http://v-beta.urp.edu.pe/pdf/id/4274/n/huamani-la-investigacion-tecnologica.pdf>.

- Maldonado, M (2006). *Sistema automático de conteo y clasificación de flujo vehicular basado en secuencias de video y redes neuronales artificiales* (Tesis de Pregrado). Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México. Disponible online:  
<https://docslide.es/download/link/tesis-mauro-2006>
- Martín de Brío, B. y Sanz Molina, A. (2,001). *Redes Neuronales y Sistemas Difusos*, 2da Ed. Ampliada y Revisada. Zaragoza, España: Editorial Alfa Omega
- Ramón, G. (2013), *Diseños experimentales* Universidad de Antioquía, Medellín, Colombia. Disponible online:  
[http://viref.udea.edu.co/contenido/menu\\_alterno/apuntes/ac37-diseno\\_experiment.pdf](http://viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac37-diseno_experiment.pdf).
- Stucchi, L (2015). *Hacia dónde se dirigen el transporte público y privado de Lima*. CEP XX Congreso Internacional del CLAD sobre la Reforma del Estado y de la Administración Pública. Lima, Perú. Disponible online:  
<http://www.up.edu.pe/egp/Documentos/stucchilu.pdf>
- Thomson, I et al. (2001). *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales*. CEPAL División de Recursos Naturales e Infraestructura Unidad de Transporte Santiago de Chile, Chile. Disponible online:  
[https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6381/1/S01060513\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6381/1/S01060513_es.pdf)