



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECONOMIA AGRICOLA

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DEL CAFÉ Y EL
PRECIO DIARIO DEL CAFÉ SUAVE COLOMBIANO UTILIZANDO
REDES NEURONALES ARTIFICIALES Y MODELOS
AUTOREGRESIVOS INTEGRADOS DE PROMEDIOS MÓVILES CON
VARIABLES EXÓGENAS (ARIMAX)

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Economía Agrícola

PRESENTA POR:

Marlio Bedoya Cardoso

Bajo la supervisión de:

Dra. Raquel Salazar Moreno



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Chapingo, Estado de México, agosto de 2016

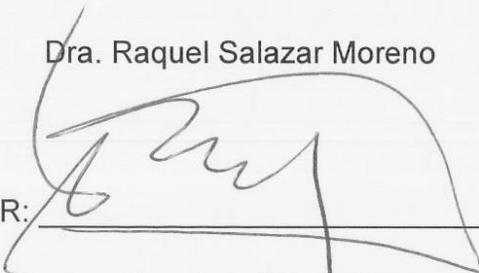
ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DEL CAFÉ Y EL PRECIO
DIARIO DEL CAFÉ SUAVE COLOMBIANO UTILIZANDO REDES
NEURONALES ARTIFICIALES Y MODELOS AUTOREGRESIVOS
INTEGRADOS DE PROMEDIOS MÓVILES CON VARIABLES EXÓGENAS
(ARIMAX)

Tesis realizada por **Marlio Bedoya Cardoso** bajo la dirección del Comité
Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

DIRECTOR:  _____

Dra. Raquel Salazar Moreno

ASESOR:  _____

Dr. Francisco Pérez Soto

ASESOR:  _____

Dr. Marcos Portillo Vázquez.

LECTOR EXTERNO:  _____

Dr. Cristóbal Martín Cuevas Alvarado

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado la oportunidad de estudiar el Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola y por ser mi guía en todo momento.

A mi papá Fernando Bedoya, a mi mamá Graciela Cardozo y a mis Hermanos Fernando M. Bedoya (Q.E.P.D), Hollman Bedoya, Diego A. Bedoya, a mis preciosas sobrinas y todos mis familiares.

A mi querida y siempre amada Esposa Nadia Brigitte Sanabria, quien fue un apoyo incondicional en todo momento, especialmente los difíciles, asimismo, a mi hijo Khalid Bedoya Sanabria, quien llenó de alegrar y felicidad mi vida.

A mis compañeros de Generación (2012-2016) por haberme brindado su apoyo, tiempo y amistad desinteresada, quienes hicieron lo posible por hacerme sentir como en casa. Sin olvidar a Silvia Helena Céspedes (Q.E.P.D), una gran compañera, que dejó una inmensa tristeza su pronta partida.

A la Embajada Colombiana en Texcoco, Familia Echavarría Campillo, en la cual siempre encontré un apoyo moral.

A mis amigos mexicanos, peruanos y colombianos que siempre estuvieron aportando sugerencias encaminadas al mejoramiento del trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que fue indispensable para llevar a cabo las actividades académicas durante mi estancia en el posgrado.

Al programa de posgrado de la División de Ciencias Económico Administrativas, por su apoyo económico y logístico.

A la Organización Internacional del Café (ICO) y a la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FEDECAFE), por facilitar información importante para la culminación del presente trabajo.

A la Dra. Raquel Salazar Moreno por su valiosa colaboración, entereza y absoluta disposición en aclarar las dudas que hicieron parte en este proceso de enseñanza aprendizaje y en la materialización de una meta que inició hace 4 años. sin ella no hubiera sido posible la culminación de este trabajo.

A mis asesores de tesis, Dr. Francisco Pérez Soto, Dr. Marcos Portillo Vázquez y Dr. Cristóbal M. Cuevas Alvarado, por sus aportes sustanciales en la finalización del trabajo de investigación.

A la Dra. Mary Poulton de The university of Arizona, por haber hecho importantes contribuciones en este trabajo de tesis.

A todos los profesores de la DICEA, quienes aportaron invaluable conocimientos académicos y experiencias profesionales que contribuyeron al buen desarrollo de este trabajo de investigación, de igual forma, a todo el cuerpo administrativo que hace parte de la División de Ciencias económico administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Marlio Bedoya Cardoso
Fecha de Nacimiento: 16 octubre de 1978
Lugar de Nacimiento: Neiva-Huila-Colombia
No. Cartilla militar 12'198.375
CURP: BECM781016HNEDRR02
Profesión: Ingeniero Agrícola
Cédula Profesional 24.392

Desarrollo Académico

Bachillerato: Colegio Nacionalizado José Acevedo y Gómez
Licenciatura: Universidad Surcolombiana
Maestría: Universidad Autónoma Chapingo

Experiencia Profesional

Ingeniería de Riegos y Obras Civiles: Ingeniero Residente
Federación Nacional de Cafeteros de Colombia: de Extensionista
Universidad Surcolombiana: Docente Catedrático Invitado
Universidad Surcolombiana: Docente Ocasional Tiempo Completo

Estimación de la producción mundial del café y el precio diario del café suave colombiano utilizando redes neuronales artificiales y modelos autoregresivo integrado de promedio móvil y variables exógenas (ARIMAX)

Estimated global production of coffee and the daily price of soft Colombian coffee using artificial neural network models and autoregressive integrated moving average and exogenous variables (ARIMAX)

RESUMEN GENERAL

La producción y precio del café a nivel internacional muestran significativas variaciones producidas por factores externos que repercuten en los ingresos de las personas que se dedican a esta actividad. Encontrar un patrón que describa el comportamiento del mercado del café y que prediga su precio con aceptable precisión, se convierte en un instrumento de apoyo relevante para la toma de decisiones en el diseño de políticas públicas dirigidas a esta actividad. Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, en el presente trabajo de investigación se emplearon redes neuronales estáticas, dinámicas y los modelos autorregresivos integrados de promedios móviles con variables exógenas (ARIMAX), para estimar la producción mundial de café y el precio diario del café suave colombiano en el mercado de Nueva York. Asimismo, evaluar el tipo de modelo que predice con mayor exactitud dichas variables. Las entradas de los modelos neuronales para pronosticar la producción y precio del café fueron 41 y 31 variables respectivamente. Los modelos neuronales contaban con una sola capa oculta en su estructura. Los modelos autoregresivos integrados de promedio móviles con variables explicativas (ARIMAX) se construyeron con la misma variable a explicar, pero con sus valores retrasados y con las variables seleccionadas después de utilizar una matriz de correlación y la metodología propuesta por Olden y Jackson (2002). Los resultados muestran que la red neuronal estática logró un mejor desempeño que la red neuronal dinámica y los modelos ARIMAX, teniendo en cuenta los resultados de los estadísticos de bondad de ajuste como son el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (MSE), el error medio absoluto, (MAE) Y la eficiencia del modelo (EF).

GENERAL ABSTRACT

International coffee production and price levels show significant variations caused by external factors that have an impact on the income of people engaged in this activity. Finding a pattern that describes the behavior of the coffee market and predicts its price with acceptable accuracy is an important support tool for decision-making in the design of public policies aimed at this activity. Considering the above, in the present research used static and dynamic neural networks and autoregressive integrated moving average with exogenous variables (ARIMAX) to estimate world coffee production and the daily price of Colombian Milds coffee on the New York stock exchange. Also, evaluate the type of model that most accurately predicts these variables was determined. The inputs of the neural models to forecast coffee production and prices were respectively 41 and 31 variables respectively. Neural models had only one hidden layer in their structure. Autoregressive integrated moving average with explanatory variables (ARIMAX) models were constructed with the same dependent variable, but with their lagged values and variables selected after using a correlation matrix and the methodology proposed by Olden and Jackson (2002). The results show that the static neural network achieved a better performance than the dynamics neural network and ARIMAX models, taking into account the results of statistical goodness of fit such as the coefficient of determination (R^2), mean square error (MSE), mean absolute error (MAE) and model efficiency (EF).

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación e importancia.....	4
1.3 Planteamiento del problema	6
1.4 Objetivos.....	8
1.5 Hipótesis	8
1.6 Metodología	9
1.6.1 Determinación de la producción mundial del café	9
1.6.2 Determinación del precio diario del café suave colombiano	9
REVISIÓN DE LITERATURA	10
2. TEORÍA DE VALOR Y DE PRECIO.....	10
2.1. Teoría de Valor	10
2.2 Teoría de Precio	17
2.3 El Contexto de la producción y comercialización del café	22
2.3.1 El cultivo del Café	23
Clasificación y Origen	23
2.3.2 Especies de café y calidad del café de acuerdo a tipo de beneficio	28
Coffea Arábica- Café Arábica.....	28
Coffea canephora - Café Robusta.....	29
Coffea liberica - café Liberica.....	30
Café no lavado (o natural):	31
Arábico lavado:	31
Cafés Especiales.....	33
2.3.3 La organización internacional del café.....	35
Los Convenios internacionales del café	35
2.3.4 Comercio internacional del café.....	38

<i>Oferta mundial del café</i>	39
<i>Demanda mundial del café</i>	45
<i>Comercialización del Café</i>	46
2.3.5 Estructura de mercado en el precio de los productos agrícolas	49
<i>Estructura de mercado del café verde y tostado</i>	50
2.4 Series de tiempo y modelos de predicción	52
2.4.1 Redes Neuronales Artificiales (RNA)	53
<i>Breve reseña Histórica</i>	53
<i>Arquitecturas de las redes</i>	53
<i>Modelo de una Neurona</i>	54
<i>Tipos de función de activación</i>	55
<i>Aprendizaje</i>	56
<i>Redes Neuronales Artificiales y sus aplicaciones</i>	57
2.4.2 Modelo Autorregresivo Integrado de promedios móviles (ARIMA)	59
<i>Breve reseña histórica</i>	59
<i>Componentes del sistema ARIMA y ARIMAX</i>	61
<i>Aplicaciones de los modelos ARIMA y ARIMAX</i>	64
2.4.3 Parámetros estadísticos de desempeño	65
LITERATURA CITADA	69
3. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS	80
3.1 OPTIMIZACIÓN DEL USO DE FERTILIZANTES PARA EL CULTIVO DE CAFÉ	80
3.2 MODELOS NEURONALES Y ARIMA EN LA ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DEL CAFE (<i>Coffea</i>)	89
3.3 SIMULACIÓN DEL PRECIO DIARIO DEL CAFÉ (<i>Coffea</i>) SUAVE COLOMBIANO EN EL MERCADO AMERICANO	106

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. PRINCIPALES PRODUCTORES DE CAFÉ DE AMÉRICA LATINA.....	5
CUADRO 2. HISTORIA Y EVENTOS EN EL MERCADO DEL CAFÉ.....	23
CUADRO 3. CLASIFICACIÓN BOTÁNICA DEL CAFÉ DE LAS PRINCIPALES ESPECIES EN EL GÉNERO COFFEA	24
CUADRO 4. IMPORTACIONES DE CAFÉ POR LOS PAÍSES MIEMBROS DE ICO EN 2013.....	39
CUADRO 5. IMPORTACIONES DE CAFÉ POR LOS PAÍSES NO MIEMBROS ICO EN 2013	39
CUADRO 6. OFERTA MUNDIAL DE CAFÉ 2013-2014	40
CUADRO 7. REEXPORTACIÓN MUNDIAL DE CAFÉ 2013.....	44
CUADRO 8. PRINCIPALES PAÍSES CONSUMIDORES DE CAFÉ AÑO 2013.....	45
CUADRO 9. COMERCIALIZACIÓN DE CAFÉ VERDE EN EL MUNDO.	46
CUADRO 10. PRINCIPALES EMPRESAS TORREFACTORAS A NIVEL MUNDIAL EN 1998	47
CUADRO 11. PERFIL DEL GRUPO ABCD O BANDA DE LOS CUATRO.	50
CUADRO 12. DISTRIBUCIÓN DE LOS INGRESOS DEL CAFÉ.....	52
CUADRO 13. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. TEMPERATURA MÍNIMA Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN DEL CAFÉ EN BRASIL.....	27
FIGURA 2. PRECIPITACIÓN EN BRASIL Y SU RELACIÓN CON EL PRECIO DEL CAFÉ SUAVE COLOMBIANO..	44
FIGURA 3. ESTRUCTURA DEL MERCADO MUNDIAL DEL CAFÉ.....	51
FIGURA 4. ARQUITECTURAS MÁS COMUNES EN LAS REDES NEURONALES	54
FIGURA 5. DIAGRAMA DE NODOS	55

INTRODUCCIÓN GENERAL

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las dos especies de café más comercializadas a nivel mundial son; El café Robusta (*Coffea canephora*), que se cultiva en Vietnam, Brasil, Indonesia, y algunos países de África y cuya participación aproximada en el mercado es del 35%. El café Arábica (*Coffea arábica L.*), constituye más del 60% del café que se comercializa a nivel internacional por su suave sabor, cosechándose principalmente en Sur América, Centro América e Indonesia, siendo Brasil el mayor productor (FEDECAFE, 2014a).

El café es considerado un producto aromático con alto contenido de cafeína, cuyo consumo en el mundo se ha venido incrementando y ganando espacio como una bebida en todas las generaciones. En el año 2013 el consumo de los países importadores del grano registró un aumento del 3.40% en comparación con el año 2012, destacándose el consumo de los países como Eslovaquia, Bélgica, Holanda y Estonia (ICO, 2015a).

Si bien el café es originario de África, su difusión en el mundo como cultivo se debe principalmente a los holandeses quienes fueron los primeros en sembrar una planta de café bajo invernadero en Holanda; posteriormente, aprovechando su poderío en la navegación trasladaron semillas de café y en 1718 llegó por primera vez al sur de América a la colonia holandesa de Surinam, y desde allí, se distribuyó en el cono sur. Asimismo, se relata que un francés de Martinica llevó desde París un arbusto de café y lo trasplantó en Martinica y en 1726 se

realizó la primera cosecha de café y para 1777 se registraban entre 18 y 19 millones de cafetos (ICO, 2015b).

A finales del siglo XIX la implementación de nuevas áreas sembradas de café en Brasil aumentó su capacidad productiva, posicionándolo como el mayor productor de café en 1906, lo que provocó una drástica caída de los precios en el mercado. Como respuesta a esta situación, en el estado de São Paulo se firmó un convenio entre los estados productores de café para recuperar el precio, el cual consistió en la retención de café para el mercado (reservas) y la prohibición de nuevas plantaciones en 10 años. Al principio esta medida fue eficaz logrando estabilizar el precio, pero alentó el exceso de la producción en otros países y no pudo hacerle frente a la caída de la demanda generada por la primera guerra mundial y la crisis económica o gran depresión de 1930, sobrellevando a la primera crisis del precio del café por sobreoferta del grano.

Para hacerle frente a la crisis del precio de café, los países productores de América Latina hicieron esfuerzos para implementar políticas en las conferencias panamericanas del café, pero fueron un fracaso. Brasil seguía acumulando reservas, y la situación lo obligó a tomar medidas más radicales. Optó entonces por la destrucción masiva de 78.2 millones de sacos de café, los cuales fueron quemados entre 1931 y 1940 (Figueroa *et al.* 2007, 113p).

Entre 1940 y 1962 se firman diferentes convenios y compromisos entre los países productores de café de América Latina y Estados Unidos, para fijar cuotas de exportación hacia ese mercado y establecer precios mínimos de venta de café. Al parecer Estados Unidos siempre se mostraba renuente de participar en las reuniones para solucionar la crisis del precio del café, pero algunos países de América Latina estaban pasando problemas de inestabilidad política y económica, lo que lo obliga a Estados Unidos a participar en dichas reuniones, pues no quería ver más revoluciones como la cubana.

Junto con la firma del primer Convenio Internacional del Café (CIC) en 1962, se fundó la Organización Internacional del Café (ICO), y este acuerdo entró en

vigor el primero de julio de 1963 con la participación de 39 países; 26 exportadores y 13 importadores. Sus objetivos eran equilibrar la oferta y la demanda, reducir los excedentes, fomentar el consumo y realizar investigaciones sobre el café (Figueroa et al. 2007, 119p).

Para equilibrar la oferta y la demanda del grano, la Organización Internacional del Café adopta un sistema de cuotas de exportación en el mercado, en el cual cada país productor tenía cierto porcentaje de participación. Este sistema logró estabilizar los precios, pues cuando el precio del café subía de cierto nivel, se aumentaba la oferta del aromático y cuando el precio bajaba de cierto nivel se retiraba oferta del grano. Esta estabilización de precios incentivó a los países a producir más café, generar sobreoferta del grano y querer mayor participación en el mercado.

Lo anterior y la existencia de un mercado fuera de las cuotas donde los países socialistas conseguían café a mitad de precio, precipitó la no renovación del Convenio internacional del Café en septiembre de 1989, lo que provocó una reducción del 39% de su precio con respecto a septiembre del año 1987, de esta forma, inicia el libre mercado del café (ICO, 2015d).

Sin embargo, las causas de la explicación de la crisis que actualmente sufre el sector cafetero en el mundo van más allá de la sobreoferta del aromático o el rompimiento del acuerdo internacional del café en 1989, ya que, en la década de los noventa el Banco Mundial ofreció a Vietnam un programa de financiamiento para la expansión de nuevas plantaciones de café. Generando un crecimiento exitoso de la oferta del grano (Ponte, 2001).

Los resultados de dicho programa de financiamiento sobre el país asiático fue el siguiente; en el periodo comprendido entre los años de 1990 al 2000, Vietnam pasó de producir 1533 a 13372 toneladas de café verde, convirtiéndolo en el segundo productor mundial, superado solamente por Brasil. Este hecho produjo una drástica caída de los precios internacionales del aromático, ya que, en enero del 2000 la libra del café suave colombiano en promedio se cotizaba en

130.13 centavos de dólar por libra y en diciembre de ese mismo año costaba 75.81 centavos de dólar la libra en la bolsa de New York (FAO, 2014; ICO, 2015c).

A principios del siglo XX, Vietnam ya era el segundo productor de café verde (Robusta) del mundo y entre los años 2000 al 2012 pasó de producir 14.8 a 22 millones de sacos de 60 kilogramos; Para el año cafetalero (2014/15) Vietnam produjo más del 19% de oferta mundial del grano (ICO, 2015c).

Durante casi cuatro años el precio promedio del café suave colombiano se situó por debajo de los 80 centavos de dólar por libra; incluso en el mes de agosto del año 2002 se registró uno de los precios promedio más bajos de su cotización, ubicándose en 58.1 centavos de dólar por libra.

Actualmente, el café es cultivado en la mayoría de los países Centro Americanos y Sur Americanos, convirtiéndose en el principal cultivo con fines comerciales del continente. En la cosecha cafetalera (2014/15) los países del continente americano aportaron un poco más del 56% de la oferta mundial del aromático (ICO, 2015c).

1.2 Justificación e importancia

El café es el cultivo más importante y comercializable para 25 millones de pequeños agricultores de 60 países tropicales (Pelupessy, 2007, 190p). En América Latina, se cultiva principalmente en Brasil, Colombia, Honduras, México, Perú, Costa Rica, Nicaragua, El Salvador, Ecuador y Venezuela (Ver Cuadro 1).

Gran parte de la economía campesina donde se cultiva el café dependen en alto grado de él, incluso para algunos países africanos puede representar más del 50% de sus ingresos totales de exportación (Love, 1999). El café ofrece un medio de vida a más de 125 millones de personas de todo el mundo y es especialmente importante para los agricultores en pequeña escala que producen la mayor parte del café en el mundo (ICO, 2015d)

Cuadro 1. Principales productores de café de América Latina

País	2012	2013	2014	Participación porcentual año 2014
	*	*	*	
Bolivia	115	128	120	0.08%
Brasil	50,826	49,152	45,342	31.96%
Colombia	9,927	12,124	12,500	8.81%
Costa Rica	1,571	1,444	1,508	1.06%
Cuba	88	107	100	0.07%
Ecuador	828	666	650	0.46%
El Salvador	1,235	537	680	0.48%
Guatemala	3,743	3,159	3,500	2.47%
Haití	350	345	350	0.25%
Honduras	4,537	4,568	5,400	3.81%
México	4,327	3,916	3,900	2.75%
Nicaragua	1,890	2,017	2,000	1.41%
Panamá	116	110	95	0.07%
Perú	4,453	4,338	3,400	2.40%
República Dominicana	488	425	400	0.28%
Venezuela	952	805	660	0.47%
Producción Total	147,562	146,745	141,850	100.00%

Fuente: Elaboración propia con datos de ICO, 2016

*Producción en miles de sacos

En México, el cultivo del café es una actividad muy importante desde el punto de vista social, económico y ambiental, dado que utiliza mucha mano de obra agrícola, entre los que se destacan los productores y sus familias, jornaleros y comercializadores. Se calcula que alrededor de tres millones de mexicanos dependen del café en algún grado (SAGARPA, 2011, 9p).

México en el año 2013 contaba con un área cosechada de café de 700.117 hectáreas, arrojando una producción de 231.596 toneladas de café; para el ciclo 2012/2013 se habían exportado hasta el mes de julio de 2013 179.655,8 toneladas por un valor de 602 mil millones de dólares (FAO, 2014; AMECAFE, 2013).

En el año 2012, Colombia contaba con un área cosechada de 778.084 hectáreas, con una producción de 464.640 toneladas de café, de las cuales se exportaron 430.106 toneladas por un valor de 2.135 millones de dólares (FAO, 2014; FEDECAFE, 2014b).

Actualmente en Colombia 563 mil familias viven directamente de la producción del café y para las actividades de manejo, cosecha y post-cosecha ocupan más del 9% de su población activa (FEDECAFE, 2014b). Cano *et al.* (2012) afirman que la industria del café en Colombia es tan importante que genera uno de cada tres empleos rurales, permitiendo que dos millones de personas vivan directamente de la producción del aromático. Convirtiéndose en una actividad estratégica para la economía del país, además de concentrar esfuerzos para mitigar la pobreza y mejorar la calidad de vida de los cafeteros.

1.3 Planteamiento del problema

El café es un dinamizador de la economía en las regiones donde se cultiva y cosecha, además es el producto agrícola más importante que se comercializa como futuros en las bolsas de Nueva York y Londres. En el año cafetalero 2014/15, Brasil, Vietnam, Colombia e Indonesia proporcionaron más del 66% del producto a nivel internacional. Por lo tanto, lo que pase con la producción del aromático en cualquiera de estos cuatro países (principalmente Brasil) puede influir fuertemente en su cotización.

El cultivo del café está enfrentado a diversos riesgos inherentes a su actividad, entre los que se destacan principalmente, el riesgo por la volatilidad del precio; que depende de la ley de la oferta y demanda, así como factores especulativos. El riesgo de la tasa de cambio; que depende de políticas monetarias y del mercado. Finalmente, el riesgo de producción; que depende de factores económicos, ambientales y culturales. Dichos riesgos, generan problemas importantes para los países que dependen en un porcentaje importante de sus exportaciones.

Para los productores, asociaciones, compradores, exportadores e importadores de café, el precio futuro es una de las variables económicas que más les gustaría saber o tener cierto grado de confianza en la estimación del mismo para su comercialización.

En Brasil algunos consultores emplean personal capacitado y un método volumétrico para estimar la zafra o cosecha de café; en Colombia la Federación Nacional de Cafeteros utiliza un método destructivo para el pronóstico de la cosecha, lo cual requiere de tiempo y dinero.

Algunos investigadores han intentado modelar el precio del café basado en análisis técnicos, donde se establece que la predicción de la cotización futura de un valor en el mercado sólo depende de valores anteriores sin tener en cuenta las variables económicas y no económicas, como es, el efecto del cambio climático sobre las zonas productoras de café y ello lleva a cometer errores en la predicción de la producción y precio.

Villers *et al.* (2009) descubrieron que las variables meteorológicas, como la precipitación, la temperatura y la radiación solar, desempeñan un papel importante en el desarrollo fenológico y funcionan como reguladores de las plantas, en los procesos de floración y desarrollo de frutos.

Otros investigadores (Kowalik *et al.* (2014); Rivera *et al.* (2013)) encontraron que el cambio climático y sus efectos sobre la agricultura son aspectos importantes al momento de predecir los productos.

La posibilidad de adoptar herramientas computacionales o de análisis de series de tiempo para determinar el comportamiento y predicción de productos agrícolas involucrando variables económicas y no económicas (meteorológicas), serían fundamentales para el diseño de políticas públicas. Basado en lo anterior, en el presente trabajo de investigación se utilizaron redes neuronales artificiales de alimentación hacia adelante o feed-forward (Estáticas) y redes recurrentes o feedback (Dinámicas), así como, modelos Autorregresivos

Integrados de Media promedios móviles con variables exógenas (ARIMAX) para proporcionar una herramienta que pueda ser utilizada en el diseño de políticas públicas dirigidas a mitigar el impacto negativo que cause el mercado sobre los ingresos de las personas que se dedican a esta actividad. Teniendo en cuenta los siguientes objetivos:

1.4 Objetivos

General

Determinar el mejor predictor de la producción internacional del café y el precio diario del café suave colombiano en el mercado de Nueva York, entre los modelos de redes neuronales artificiales (RNA) y modelos Autorregresivos Integrados de promedios Móviles con variables explicativas (ARIMAX) teniendo en cuenta el desempeño estadístico del modelo.

Objetivos específicos

- Identificar las variables más importantes que influyen en la producción mundial del café.
- Determinar las topologías de red neuronal artificial más eficiente en la estimación de la producción y precio del café.
- Identificar las principales variables económicas y no económicas que influyen en la cotización del café.
- Determinar la estructura del Modelo Autorregresivo Integrado de Media Móvil con variables exógenas (ARIMAX) que mejor describa el comportamiento de la producción y precio del café.

1.5 Hipótesis

Es posible predecir con mayor exactitud la producción mundial del aromático y posteriormente el precio diario del café suave colombiano, utilizando una red neuronal artificial empleando variables económicas y no económicas, en

contraste con los modelos Autorregresivos Integrados de promedios Móviles con variables explicativas ampliamente utilizados en series de tiempo.

1.6 Metodología

1.6.1 Determinación de la producción mundial del café

Se utilizaron datos de precipitación acumulada, temperatura máxima y mínima de 4 estaciones meteorológicas ubicadas en la zona cafetalera de Brasil, igualmente, la serie de tiempo con la producción y algunas variables técnico-económicas de los cuatro principales productores de café del mundo (Brasil, Vietnam, Colombia e Indonesia). El periodo de análisis fue desde 1961 hasta el año 2014.

1.6.2 Determinación del precio diario del café suave colombiano

Se definieron las siguientes variables económicas para el pronóstico del precio diario del café suave colombiano en el mercado de Nueva York: la tasa de cambio y los índices bursátiles de los principales consumidores de café (Dow Jones Industries, el S&P 500, el Nikkei 225, y el índice DAX). Asimismo, se emplearon los datos de la temperatura y la precipitación de 4 estaciones meteorológicas en la zona productora de café en Brasil y 7 estaciones en Colombia. El periodo de análisis inició el primero de octubre de 1990 hasta el 30 de septiembre del año 2014.

Los modelos empleados fueron; redes neuronales artificiales de prealimentación o feed-forward (Estáticas) y redes recurrentes o feedback (Dinámicas), cuyas entradas fueron las variables mencionadas anteriormente. Los modelos Autorregresivos Integrados de promedios Móviles (ARIMAX), emplearon 10 variables explicativas, y la misma variable a explicar, pero con sus valores retrasados.

REVISIÓN DE LITERATURA

2. TEORÍA DE VALOR Y DE PRECIO

2.1. Teoría de Valor

“Las teorías del valor se han dividido globalmente en dos grandes grupos: objetivas y subjetivas. Las teorías objetivas sostienen que el valor está en las cosas, mientras que las subjetivas sostienen que el valor lo da el individuo” [...] Por ejemplo; para los escolásticos como Johannes Buridanus el valor se calcula a partir de las necesidades humanas y es la satisfacción de estas necesidades la medida real de los bienes económicos, y entre mayor sea la satisfacción más importante es la necesidad satisfecha (Cachanosky, 1994, p 18).

Sin embargo, el valor de un bien se define únicamente como el tiempo de trabajo requerido para adquirir los factores de producción y el empleado para fabricar o elaborar ese bien, por lo tanto, la medida de valor se realiza en unidades de trabajo, con la condición de que ese trabajo debe ser socialmente necesario (Marx, 1867).

Por otra parte, el precio que un productor logra por una mercancía está determinado por una serie de circunstancias que pueden resumirse todas en la fórmula de la oferta y la demanda. Pero, si se considera que el valor de una mercancía es determinado por el valor medio del trabajo es posible que el productor no alcance este valor en el mercado (Marx, 1867, p 67).

El mismo autor añade que cada producto debe ser útil en cierto grado y responder a una necesidad real o imaginaria si debe convertirse en mercancía y

adquirir un valor. “El valor de uso es condición preliminar del valor de cambio, pero ello no determina el importe de este último”.

La palabra valor tiene dos significados, el primero es el valor de uso, que expresa la capacidad que tiene un bien o servicio para satisfacer una necesidad (utilidad) y el segundo es el valor en cambio, que consiste en la capacidad de comprar otros bienes, capacidad que deriva de la posesión del dinero (Ricardo, 1959, p 9). El mismo autor menciona que, las cosas que tienen gran valor de uso, generalmente tienen poco o nulo valor en cambio, por el contrario, las cosas que tienen gran valor en cambio tienen poco valor en uso o no tienen. Sin embargo, para Bailey un economista vulgar inglés, el valor es una relación cuantitativa que posee una mercancía para ser cambiada por otra, por lo tanto, para él sólo existe el valor de cambio y no reconoce el valor de uso (Rosenberg, 1979, p 105)

En ese sentido, los productos que se ofrecen en el mercado deben tener un valor de uso social, por ejemplo, cuando las mercancías son destinadas para el consumo del productor y de su misma familia adquiere sólo valor de uso; pero cuando este producto, en virtud de la división social del trabajo, es destinado al mercado, ya adquiere un valor de uso social. Por lo tanto, la producción de mercancías, debe satisfacer las necesidades del productor y las de quienes adquieran estos productos, sin embargo, además de poseer un valor de uso social, todo producto debe ser cambiante por otra mercancía (Rumiántsev, 1980, p 109).

Los productos agrícolas poseen la dualidad del valor de uso y cambio, por ejemplo, una taza de café, un helado, un dulce, un pastel o cualquier producto a base de café genera un placer y satisfacción a la persona que lo consume (valor de uso), sin embargo, el valor en cambio, lo obtiene el caficultor o el intermediario cuando vende el producto, con el cual obtendrá un dinero y con el mismo podrá adquirir otros bienes que necesita.

El valor de cambio es la característica que tiene un producto de cambiarse por determinada cantidad de otro, sin embargo, estos productos pueden tener diferente valor de uso, pero deben ser equiparables en una medida y es generalmente la cantidad de trabajo empleada para su fabricación lo que las hace comparable (Rumiántsev, 1980, p 110).

“La utilidad de un objeto lo convierte en valor de uso” y la magnitud del valor de un objeto está determinada por la cantidad de trabajo o tiempo de trabajo necesario para la su producción (Marx, 1867, p 66).

De esta forma, el trabajo empleado para la elaboración de una mercancía fue la primera forma de pago en la etapa de la vida económica, así, se intercambiaban los bienes de acuerdo a la cantidad de trabajo que estos requerían. Los obreros mediante su trabajo creaban valor a las mercancías que producían. De esta forma, la acumulación del capital se forma cuando se utilizaba fuerza laboral, tierra, maquinaria y capital (Smith, 1937).

Los bienes que tienen valor en cambio derivan su valor de dos formas; la primera de ellas es la cantidad de trabajo requerida para obtenerla y la segunda es debido a su escasez en el mercado. La mayoría de los bienes que son objetos de deseo, se obtienen mediante el empleo de trabajo y son multiplicados por diferentes naciones, casi sin ningún límite determinable si se está dispuesto a dedicar el trabajo necesario para producirlo. Algunos bienes están determinados por su escasez y ningún trabajo puede aumentar la cantidad de esos bienes, su valor no puede ser reducido por la oferta de los mismos (Ricardo, 1959, p 9).

El trabajo concreto se invierte en una forma determinada para crear valor de uso, y este valor es el resultado de la asociación de dos elementos, ellos son, la materia de la naturaleza y el trabajo. Por otra parte, el trabajo abstracto, es el

que “expresa lo que hay en común en el trabajo de los productores de mercancías en la realidad objetiva”, en otras palabras, es el trabajo general efectuado por trabajadores y el trabajo social se manifiesta con el intercambio de mercancías (Kautsky, 1968, p 66).

Si la cantidad de trabajo empleada en los bienes determina su valor en cambio, cualquier aumento de la cantidad de trabajo debe elevar el valor de este bien, pero, si este disminuye de igual forma el valor en cambio de este producto debe disminuir (Ricardo, 1959, p 11; Marshall, 1978, p 6). Sin embargo, para los productos agrícolas el valor en cambio es el mismo valor del mercado y el aumento o disminución de trabajo para su producción no tienen influencia sobre éste.

El cambio de valor de la fuerza de trabajo no ejerce influencia alguna en el valor de la mercancía, solo influye en la plusvalía, ya que, el aumento o disminución de la fuerza de trabajo provoca el aumento o disminución de la plusvalía, por otra parte, los economistas vulgares reemplazan la teoría del valor del trabajo por la teoría de los costos de producción (Rosenberg, 1979, p 300-306).

El mismo autor en la página 107 afirma que el valor de los productos es la magnitud del trabajo, la cual está medida como la cantidad de mercancías obtenidas por unidad de tiempo de trabajo invertida para su producción. Por lo tanto, el cambio en la productividad del trabajo produce cambios en el valor por unidad de mercancía. Como lo ratifica Marx en su tesis “la magnitud del valor de la mercancía cambia de manera directamente proporcional a la cantidad e inversamente proporcional a la fuerza productiva del trabajo que se encuentra realizado en una mercancía”.

Richard Cantillon argumentaba que todos los bienes tenían un precio o valor de cambio intrínseco y otro determinado por la necesidad de los individuos, el valor intrínseco hace referencia a la cantidad de factores de producción empleados

para su fabricación, por ejemplo en la agricultura se emplea una determinada cantidad de trabajo y tierra para producir un cultivo determinado, los excedentes de este cultivo que no sean consumidos por la familia serán ofrecidos al mercado, por lo tanto si hay mucha oferta de este producto, el precio del mercado estará por debajo del valor intrínseco (Cachanosky, 1994, p 42).

La oferta de los productos agrícolas se ve afectada por las condiciones climáticas que influyen en el rendimiento de los cultivos y que están asociadas a diferentes plagas y enfermedades de las plantas que se cultivan a cielo abierto, de igual forma, las buenas prácticas de manejo como la fertilización y control de arvenses influyen en el rendimiento y por ende en la oferta del mismo. Y la demanda de los productos agrícolas está influenciada por la necesidad y cantidad que este producto ocupe en la canasta básica, por los cambios en las preferencias de los consumidores, por la cantidad de bienes sustitutos que se encuentren en el mercado, por tradición de consumo o simplemente porque genera al consumidor final una sensación de utilidad.

En un artículo sin terminar titulado valor y moneda de Anne Robert Jacques Turgot y en reflexión sobre la formación y la distribución de la riqueza, comenta que el valor expresa el placer relativo de las necesidades que poseen los bienes y se adaptan al placer para satisfacer un deseo (Cachanosky, 1994, p 44).

Las variaciones entre la oferta y la demanda de un producto en el mercado pueden explicar, por qué el precio y no el valor de una mercancía pueden subir o bajar de un día para otro, algunas veces estas variaciones de precio se reflejan el mismo día (Marx, 1867, p 66).

Sin embargo, como lo manifestó David Ricardo hay algunos bienes que su precio está determinado por la escasez del mismo y en este tipo de productos el valor natural siempre está por debajo del precio del mercado. Un ejemplo de

ello es: “El precio más elevado del Johanninsberg o del Rüdesheim proviene de que no en todas partes pueden cultivarse los vinos del Rin” en este caso la ley del valor ya no tiene validez para establecer el precio del producto en el mercado, ya que se está enfrentado a una estructura de mercado llamada monopolio; de esta forma lo expone Kautsky, en su obra *La cuestión agraria: análisis de las tendencias de la agricultura moderna y de la política agraria de la socialdemocracia*.

Para determinar el valor real de una mercancía es necesario tener en cuenta los costos de producción, de igual forma, es ineludible añadir a los costos de producción el valor creado por el empleo del trabajo en la fabricación del producto (Kautsky, 1968, p 72).

En ese mismo sentido Rosenberg, presenta lo siguiente: lo que le cuesta verdaderamente al capitalista la producción de mercancías es el valor de los elementos gastados del capital productivo.

Por otra parte, la teoría de valor basada en la utilidad marginal indica que el valor de un bien está dado por la utilidad de la última necesidad que satisface, por lo tanto, la utilidad es la capacidad que tiene un bien o servicio en generar placer o evitar malestar (Cachanosky, 1995, p 6).

La teoría marginalista del valor utiliza los excesos y extremos para dar firmeza a sus argumentos. Por ejemplo, el efecto placer que una taza caliente de café le produce a un consumidor un día frío es de gran utilidad, pero en la medida que este consumidor decida tomar más tazas de café, cada taza adicional le estará produciendo una menor utilidad, a tal grado que esta utilidad pueda volverse negativa y perjudicial para su salud, lo anterior es lo que se conoce como ley de la utilidad decreciente.

Braudel y Gemelli (1981) mencionan que, la división del trabajo hizo que se empezara una producción masiva y diversa de mercancías que cambio el modo de vida, pasando de lo cotidiano, donde no existía el intercambio, a la vida económica o a la economía de mercado de capital, donde se rompe el vínculo entre el productor y el consumidor, de esta forma los productos van a los mercados donde obtendrán mejores utilidades.

Los mismos autores señala, que una vez desarrollada la vida económica, donde los intercambios son frecuentes en las ciudades y las ferias, se hizo necesario la creación de un artículo que englobara el valor o precio de cada producto, por lo tanto, se elige el metal como moneda, especialmente se empleó el oro y la plata, aunque otros pueblos eligieron otro metal que servirían como moneda.

Por lo tanto, toda mercancía tiene un valor de cambio, y este valor de cambio se transforma en venta en el momento que se convierte en moneda recibida por la mercancía, asimismo, la moneda tiene un valor de uso universal que todos desean recibir a cambio por su mercancía y sirve como medida de valor para otros productos o mercancías, de esta forma la cantidad de mercancía-dinero que se entrega por determinado producto se llama precio de aquella mercancía (Kautsky, 1968, p 66).

La teoría que pretende explicar el valor de las mercancías basadas en el valor del trabajo es adecuada para explicar el valor de los productos industriales, siempre y cuando, la oferta de estos productos no sobre pase la demanda, además, el valor del trabajo no influye en nada en el valor de venta de los productos agropecuarios, sólo influye para determinar los costos de producción.

Por otra parte, los economistas vulgares, respaldan el valor de las mercancías en los costos de producción los cuales determinan el valor real de una mercancía, debido a la utilización de todos los elementos de producción, sin embargo, este valor muchas veces no se alcanza en el mercado.

El valor de las mercancías se puede explicar mediante una combinación de las teorías objetivistas, subjetivistas de valor y la incorporación de la escasez y la ley de oferta y demanda de la mercancía. Por un lado, se sabe que toda mercancía posee características que satisfacen alguna necesidad en forma total o parcial de quienes lo adquieren, por otro lado, es la psicología del consumidor final, la que influyen en la formación de ese valor en el mercado, ya que es el consumidor final quien está dispuesto a pagar por el producto, y finalmente, la escasez y necesidad de esa mercancía influirán directamente sobre el valor que se pueda alcanzar.

Basado en todas las apreciaciones sobre la teoría de valor expuesta anteriormente, y teniendo en cuenta que el mundo es cada vez más globalizado se hace indispensable la intervención del gobierno mediante la implementación de políticas públicas que vayan encaminadas a mitigar el efecto, adverso del mercado sobre los ingresos de las personas que se dedican a la producción de alimentos en el campo, de esta forma el valor de las mercancías producidas en el sector agrícola se reducen, y se vuelven competitivas.

2.2 Teoría de Precio

Todos los productos que se ofertan en el mercado tienen un precio natural y un precio de mercado; el precio natural hace referencia a la cantidad de factores de producción empleados para la elaboración de una mercancía, puede ser un bien o un servicio, Sin embargo, el precio de mercado de un producto (bien o servicio), es aquel que es fijado por la ley de la oferta y la demanda, por lo tanto, éste varía de acuerdo a la utilidad, preferencia y escasez de esa mercancía (Smith, 1937; Ricardo, 1959, p 69).

El precio es el valor monetario de un bien o servicio que generalmente es definido por el mercado. “el precio se encuentra determinado por las fuerzas que influyen en la demanda y oferta” (Zorrilla y Silvestre, 2011).

Así, el precio de una mercancía, es lo que se llama precio de mercado, el cual se regula por la cantidad de un artículo llevado al mercado y por la demanda del mismo. Cuando la oferta excede la demanda, algunos de los componentes del precio, están por debajo de su tasa natural (Smith, 1937).

Por otra parte, el precio de equilibrio de un producto en el mercado es, el precio al que la cantidad ofrecida y la demandada se igualan. Asimismo, la determinación del precio depende de la estructura del mercado (tamaño, determinado por el número de compradores y vendedores, diferenciación del producto, facilidades de entrada de nuevas unidades de producción etc.).

En la teoría microeconómica el precio de un bien o servicio está definido por una función de precio, la cual depende de la cantidad empleada de factores de producción. Por lo tanto, la determinación técnica del precio de las mercancías que no se utilizan como medio de producción, no pueden ser independientes de la cantidad y el precio de las mercancías que se emplean para su producción (Benetti, 1978, 151p).

Adam Smith y David Ricardo lo llaman determinación de los costos totales de producción (renta de la tierra, salarios de trabajadores y beneficios del capital). En el mercado de los productos agropecuarios los factores de producción participan porcentualmente en la formación del precio del producto y la ganancia del agricultor está determinada por el beneficio de capital, desafortunadamente en éste mercado los únicos que ven disminuir su ganancia cuando el precio natural está por encima del precio del mercado son los productores.

En este sentido, los precios de producción no son aquellos precios según los cuales se vende la mercancía en el mercado, en la acción de compra-venta. Ya que en primer lugar la cuota media real de la ganancia no coincide con la cuota general de la ganancia, solo fluctúa a su alrededor. Asimismo, los precios del mercado se establecen según la ley de oferta y demanda. (Rosenberg, 1979, p 370).

Uno de los factores que determinan el precio de las mercancías es el grado de tecnología que se aplique en ellas (Benetti, 1978, 151p). No obstante, un alto nivel de tecnificación empleado en la producción de productos agrícolas sólo sirve para disminuir los costos de producción y aumentar la oferta de los mismos en el mercado. Por lo tanto, se tendría que hacer un análisis económico y determinar si la reducción de costos alcanzada por la tecnificación del proceso de producción compensa la disminución del precio del producto por sobreoferta.

En el sector industrial el nivel general de precios se elevará como consecuencia de un aumento en la tasa del salario, sin embargo, en el sector agrícola los precios de los productos permanecen constantes ante un incremento de los salarios de los trabajadores, de esta forma, la reducción de la ganancia siempre recae sobre las rentas del productor (Hollander, 1988, p 29).

Si se afirma que el precio de las mercancías se determina o regula por los salarios, esta afirmación es cierta, estrictamente en el sentido de establecer parte del costo real de los productos agrícolas ofertados en el mercado. Sin embargo, para el caso específico de los salarios de los trabajadores que recolectan el café en Colombia, este varía de acuerdo a; el precio que tenga el producto al momento de la cosecha, la disponibilidad de mano de obra, la posición geográfica del lugar, y las condiciones de vivienda y alimentación que se ofrezcan en el sitio de trabajo.

“Suponiendo que los tipos de remuneración de los diferentes factores productivos que entran en el costo marginal cambian todos en la misma proporción, que los salarios, se deduce que el nivel general de precios (considerando conocidos la técnica y el equipo) dependen, en parte, de la unidad de salarios y, en parte, del volumen de ocupación” (Keynes, 1936). Sin embargo, el precio de los productos agropecuarios no depende del costo de la unidad del salario, pues si éste aumenta, es muy probable que el precio de los productos agropecuarios no lo haga, pero si el precio del producto sube, es muy probable que la unidad de salario se incremente.

De esta forma, la ganancia en el sector primario es inversamente proporcional al precio de los insumos utilizados para su elaboración, por lo tanto, el movimiento de los precios de las materias primas habitualmente se ve acompañado de una serie de otros factores, de los cuales unos actúan en la misma dirección que el movimiento del precio y otros se le confrontan (Rosenberg, 1979, p 342).

El mismo autor menciona, que la reducción del precio de las materias primas puede tener distintas consecuencias según: el volumen de las reservas de las materias primas en manos de los fabricantes de los productos finales, y el precio de los semifabricados y artículos terminados.

En el mercado del café un gran volumen de las reservas en manos de los comercializadores y tostadores, hacen susceptible esta actividad de la especulación. Ejerciendo una fuerte presión hacia la baja del precio de café, con ello logran vender sus existencias y comprar grandes volúmenes a bajos precios, en conclusión, renuevan sus stocks o existencias y provocan reducción o elevación de la cuota de la ganancia en toda la cadena de comercialización.

Para el caso de competencia perfecta se producirá hasta donde el costo marginal se iguala a la curva de la demanda de dicho producto, por lo tanto, el precio es igual al costo marginal. “En el caso de competencia perfecta, el vendedor no puede modificar el precio del mercado por una reducción de sus ventas; la curva de costo marginal corta en el mismo punto a las curvas de ingreso marginal y del ingreso medio” (James, 1974, p 152).

Por otra parte, el monopolio es ineficiente socialmente hablando, ya que produce menos para obtener un mayor precio, por lo tanto, el monopolio maximiza su utilidad donde el costo medio y marginal son iguales. “En el caso de monopolio, por el contrario, el vendedor empuja su oferta hasta el punto de intersección de la curva de costo marginal con el ingreso marginal, pero ya no con el ingreso medio (curva de la demanda). En el monopolio se controla la cantidad a producir o el precio de venta del producto, pero, no ambos. El precio

en una producción limitada al nivel de la demanda aumenta las oportunidades de importantes utilidades” (James, 1974, p 152).

Otra estructura de mercado es el duopolio, que por construcción es la mejor respuesta de un duopolista a la acción a otro, se puede explicar mediante el modelo de Agustín Cournot propuesto en 1838, donde, existen dos funciones de costos y una sola función de precios que depende de las cantidades producidas por las dos empresas.

“Bertrand había protestado contra esta forma de ver, afirmando que cada uno de los competidores, en caso de duopolio trata de eliminar al otro mediante bajos precios hasta el momento en que el precio se establece al nivel de costo de producción más bajo, de modo que no hay lugar a ganancia (James, 1974, p 153).

Para Jean Batiste Say, el precio corriente es la necesidad que una persona le otorgue a un bien y este depende de la constitución física y moral de la persona, de sus costumbres, del lugar donde vive y de su núcleo familiar (Cachanosky, 1995, p 2).

Sin embargo, para la escuela de Lausana, quienes utilizaban la utilidad marginal, los precios no eran el resultado de los costos reales de los productos como lo expresaban los clásicos, sino, que este dependía de las diferentes utilidades que poseían los productos (Castaño et al., 2004, p 162).

Las teorías que vinculan el precio de las mercancías con el salario de los trabajadores que intervienen en ella, solamente miden parte de los costos totales empleados en la fabricación de ese bien, de igual forma, incluir todos los costos empleados en la producción de mercancías sirve para determinar el precio natural, pero el precio del mercado no toma en cuenta el precio natural, ya que este es regido por la necesidad del bien o servicio y por la escasez del mismo.

La formación del precio de los productos agrícolas depende de la escasez de los mismos en el mercado, que depende del grado de tecnificación empleado para su elaboración, de las características climáticas que influyen en el desarrollo vegetativo y productivo de todo cultivo; asimismo, los cambios de preferencia de los consumidores hacia determinados productos aumentan o disminuyen su demanda. Por lo anterior, son más las condiciones que no puede controlar un agricultor para la fijación del precio de sus productos que las que el controla.

El precio del café verde que se comercializa como futuros en las Bolsas de Valores refleja el valor del mercado, que en teoría debería ser regido por la ley de la oferta y la demanda, pero la especulación en los mercados generadas por las grandes empresas compradoras y vendedoras de productos (oligopsonios y oligopolios) tienen cierta influencia sobre el precio de los productos en el corto plazo.

La política fiscal puede influir sobre los precios agrícolas al productor a través de infraestructura que logre mejorar el acceso al mercado, mediante el buen estado de las carreteras, crear centros de acopio y mejorar las instalaciones portuarias. Tales inversiones influyen en los precios al incrementar la oferta en el mercado (Norton, 2004).

2.3 El Contexto de la producción y comercialización del café

Son muchas las versiones que se tiene de la historia del café, pero Chu, (2012) en su libro el café: efecto emergente sobre la salud y prevención de enfermedades, resume los eventos claves y la historia del café en la Cuadro 2.

Cuadro 2. Historia y eventos en el mercado del café

Año	Evento
600-800	Descubrimiento del café en Etiopia
1000	Los Comerciantes Árabes Inventa la Bebida del café poniendo a hervir los granos
1000-1600	El café es cultivado y tostado exclusivamente en Arabia. La primera tienda de café es abierta en la Meca en la edad media
1475	El café rumbo a Europa: Se abren la primera tienda de café Kiva Han en Constantinopla, después ingresa a los Turcos Otomanos en 1453
1607-1615	Se introduce el café en Norte América, Comerciantes de Venecia llevan el café a Europa
1600s	Se abren las primeras casas europeas de café: Italia 1645, Inglaterra 1652, Paris 1672, Viena 1675 y Berlín 1721
1675	Inicia el refinamiento y filtrado de la bebida, endulzando y añadiendo leche, lo cual empieza en Viena
1700	Las colonias francesas y británicas introducen la planta del café a Centro y Sur América
1727-1773	Empieza en Brasil la Industria del Café, En la fiesta del té de Boston hacen beber café como un deber patriótico
1901	El primer café soluble inventado por el químico americano-japonés Satori Kato
1903-1927	Primer café descafeinado inventado en Alemania, Introducción de la primera máquina de producción del expreso "crema"
1946	Nace el Cappuccino en Italia
1958	Desarrollo de la primera máquina eléctrica de café filtrado
1990	Fenómeno de las cafeterías en Norte América
Ahora	Un generalizado uso de cafetaleras de una sola porción.

Fuente: Adaptado de Kraft Food 2008: Coffee Antioxidants and Health, Kraft Foods R&D, Inc, Munich, Germany.

2.3.1 El cultivo del Café

Clasificación y Origen

Las plantas que producen el café están clasificadas dentro del género *Coffea*, y han sido estudiadas por más de 200 años antes de la descripción en términos modernos que realizó Linnaeus en 1737. Este género se ha vuelto de inmensa importancia económica, especialmente durante el último siglo (Wellman, 1961).

El género *Coffea* pertenece a la familia de las rubiáceas y este género cubre aproximadamente 70 especies y las dos principales especies cultivadas a nivel mundial son *Coffea arábica* and *Coffea canephora* o variedad robusta (Wintgens, 2009, p 2). En una introducción realizada por Farah y dos Santos (2014), realizaron la siguiente clasificación botánica de algunas de las principales especies del género *Coffea* (Cuadro 3).

Cuadro 3. Clasificación botánica del café de las principales especies en el género *Coffea*

Reino	Vegetal
Subreino	<i>Angiosperma</i>
Clase	<i>Dicotiledónea</i>
Subclase	<i>Sympetalae o Metachlamydeæ</i>
Orden	<i>Rubiales</i>
Familia	<i>Rubiaceae</i>
Género	<i>Coffea</i>
Subgénero	<i>Eucoffea</i>
Especie	<i>Coffea arabica; Coffea canephora; Coffea liberica; Coffea eugenioides; Coffea congensis; Coffea salvatrix; Coffea racemosa; Coffea zanguebariae; Coffea pseudozanguebariae; Coffea mongensis; Coffea humilis; Coffea kapakata; Coffea brandi; Coffea perrieri; Coffea pervilleana.</i>

El origen del *Coffea arábica* es Etiopia (Abisinia) y esta especie es cultivada en alturas que oscilan entre los 1300 y 2000 metros, por otra parte, el *Coffea canéfora* es cultivado en elevaciones inferiores a los 1000 metros sobre el nivel del mar y su origen se da en los países de África tropical. El *Coffea liberica* tiene sus orígenes en las tierras bajas del oeste de África y su clasificación se realizó en Liberia, de ahí proviene su nombre, y la otra especie, el *Coffea excelsa*, es nativa de las tierras bajas del oeste y centro de África (Wintgens, 2009, p 2; Chu, 2012, p 5).

Las dos especies de café más importantes económicamente son; *Coffea arábica* (café arábico) que representa más del 60 por ciento de la producción

mundial y el *Coffea canephora* (café Robusta). Las otras dos especies se cultivan en una escala mucho más pequeña (ICO, 2013).

Fases fenológicas del cafeto

Todas las especies de leguminosas, gramíneas, árboles y arbustos que se utilizan con fines comerciales tiene tres fases bien determinadas, las cuales son: fase vegetativa, fase reproductiva y fase de senescencia.

La fase vegetativa en especies perennes y arbustivas como el cafeto, puede durar toda la vida de la planta y la mayor parte del tiempo se intercalan con la fase reproductiva. El inicio de la fase reproductiva empieza con la aparición de las primeras flores. Finalmente, a partir de los 6 a 8 años inicia la fase de senescencia y la planta comienza a deteriorarse paulatinamente, la velocidad de deterioro depende de: la región donde se cultiva, la disponibilidad de nutrientes, la oferta ambiental, la forma de explotación y la presencia de plagas y enfermedades (Arcila et al. 2007, p 57).

La fase vegetativa se compone de la formación de las ramas y hojas de la planta, en ésta última se realizan los tres procesos fenológicos más importantes que soportan el desarrollo vegetativo y productivo de las plantas, ellos son la fotosíntesis, la respiración y transpiración, asimismo, las hojas cumplen funciones adicionales como, proteger las yemas, flores y frutos contra condiciones climáticas extremas como las granizadas y el exceso de radiación (Arcila et al. 2007, p 33).

El desarrollo de la parte aérea de la planta del café implica el alargamiento vertical (ortotrópico) debido a la activación de la zona apical, y el alargamiento horizontal (plagiotropo) o formación de ramas, se da por el crecimiento sucesivo de pares de hojas opuestos en cada nodo que se encuentran en las axilas de las hojas (Wintgens, 2009, p 9)

La formación de hojas en las plantas de café ocurre todo el año, pero existen condiciones climáticas como la radiación y la humedad del suelo que favorecen

una mayor tasa de crecimiento en determinadas épocas del año. Sin embargo, los factores que afectan el desarrollo vegetativo del cultivo del café son: las variaciones climáticas especialmente periodos prolongados de sequias, la cantidad de nitrógenos y magnesio presente en el suelo que influyen en la fotosíntesis, las plagas y enfermedades que reducen la vida de las hojas, tales como el hongo de la Roya y el minador de la hoja. Y finalmente las podas realizadas a las plantas. (Arcila et al. 2007, p 55).

La fase reproductiva del cafeto empieza con la aparición de las primeras flores, la cual está influenciada por las condiciones climáticas y se considera la primera floración, cuando al menos el 50% de las plantas tengan flores. Asimismo, como las hojas, la formación de flores se ve afectada por los factores climáticos, ambientales, nutricionales, patológicos y genéticos (Arcila et al. 2007, p 37).

Existe una relación entre las condiciones climáticas y la floración, puesto que, en zonas tropicales donde la variación diaria de características meteorológicas como la precipitación, la temperatura y el brillo solar son más marcadas que a nivel estacional, éstas estimulan los procesos fenológicos de las plantaciones del café (Ramírez et al., 2011).

Desde el momento de la floración hasta la maduración del fruto transcurren aproximadamente 8 meses o 32 semanas, en promedio el desarrollo del fruto tarda entre 220 y 240 días, dependiendo de las características de la zona donde se encuentre la plantación (Arcila et al. 2007, p 45).

La productividad del cultivo del café depende de los efectos positivos que causen los diferentes factores empleados en la producción del mismo, estos factores son los climáticos, edafológicos y el manejo agronómico.

Los principales factores climáticos que influyen en la producción del cultivo del café son: la radiación y la temperatura que varían de acuerdo a la altitud y latitud, asimismo, la disponibilidad de agua, representada por la precipitación en la zona cafetalera.

Las condiciones climáticas extremas en las zonas cafetaleras de los países productores del grano, han producido fuertes variaciones en la oferta internacional del café. Por ejemplo, en Brasil desde el año 1962 hasta la cosecha cafetalera del ciclo 2013/14, se presentaron diversos eventos climáticos relacionados con heladas y sequías, destacándose principalmente los ocurridos en 1965, 1975, 1981 y 1994, los cuales fueron responsables de reducir la oferta mundial del grano en 18.1, 14.9, 17.9 y 6.3 millones de sacos de 60 kilogramos respectivamente (Figura 1).

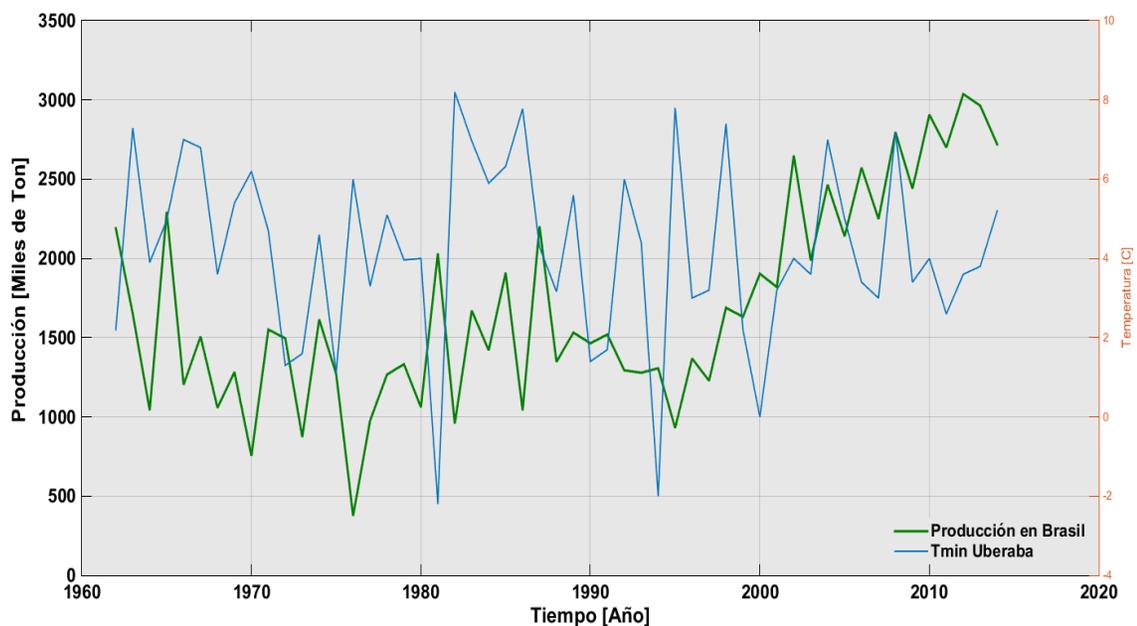


Figura 1. Temperatura mínima y su relación con la producción del café en Brasil.

Analizando y relacionando la variación de la oferta del grano en Brasil entre 1962 y 2014, con la temperatura mínima se identificó que temperaturas entre 2 y -2 grados centígrados en la zona cafetalera, afecta significativamente la cosecha para el año siguiente entre un 28 y 70% dependiendo de la duración e intensidad (FAO, 2014; INMET, 2015).

Los factores edafológicos que intervienen en la productividad de los cultivos son: la textura y la estructura del suelo. El suelo es donde se desarrolla el

sistema radicular y este provee a la planta de nutrientes, agua y aire importantes para la producción del cultivo.

Los factores de manejo agronómico que influyen directamente en la productividad del café son: la variedad, la densidad de siembra, el programa de fertilización, manejo integrado de arvenses y enfermedades.

2.3.2 Especies de café y calidad del café de acuerdo a tipo de beneficio

Coffea Arábica- Café Arábica

Coffea arábica fue descrita por primera vez por Linnaeus en 1753. Las variedades más conocidas son 'Typica' y 'Bourbon', pero a partir de estas muchas cepas diferentes y variedades se han desarrollado, como Caturra (Brasil, Colombia), Mundo Novo (Brasil), Tico (América Central), la enana San Ramón y el Blue Mountain de Jamaica (ICO, 2013).

La variedad borbón recibe su nombre de la isla borbón donde fue cultivado por los franceses y probablemente es una forma mutante de la variedad Típica. Se dice que la V. borbón tiene mayores rendimientos y según algunos informes tiene mejor calidad cuando se aplica a licores. La V. Típica, es ampliamente cultivada en Centro, Sur América y África oriental (Clarke y Macrae, 2012, p 4).

La planta del arábica es un arbusto grande con hojas ovaladas de color verde oscuro. Esto es genéticamente diferente de otras especies de café, que tiene cuatro juegos de cromosomas en lugar de dos. Los frutos son ovalados y se maduran entre 7 a 9 meses. Dado que el café Arábica es a menudo susceptible al ataque de plagas y enfermedades, la resistencia es un objetivo importante de los programas de fitomejoramiento. El café arábico se cultiva en toda América Latina, en África central, África oriental, en la India y, en cierta medida, en Indonesia (ICO, 2013).

La investigación genética para encontrar plantas de *C. arábica* de mayor productividad y resistentes a enfermedades, especialmente al hogo de la roya (*hemileia vastatrix*) han originado variedades de la misma especie, como es el caso del *Catimor* descubierto en la isla de Timor, *Catuai* originario de Brasil, *Guarnida* producido por IMECAFE y el Variedad *Colombia* y/o *Castillo* producido en Colombia.

La variedad Típica descrita por Linneo, “Fue la primera variedad que se cultivó extensivamente en América, con una amplia adaptación a diferentes tipos de suelos y climas” (Arcila, et al. 2007).

La variedad caturra es una de las variedades más comerciales y hace parte de la especie arábica, cuyo arbusto es de porte bajo el cual permite ser establecido en altas densidades de siembra favoreciendo la obtención de mayores producciones por unidad de superficie. Sin embargo, esta variedad es altamente susceptible al ataque de enfermedades como la Roya y la enfermedad de la Cereza, causadas por hongos patógenos que limitan la producción y alteran la calidad del grano (Alvarado et al., 2005).

El mismo autor menciona que, la variedad Castillo una variedad creada en Colombia, utiliza progenitores de la variedad caturra y el híbrido del Timor, el cual ha sido muy utilizado como progenitor resistente en programas de mejoramiento genético para muchos países, ya que, posee 5 factores de resistencia específica al hogo de la roya y un fondo poligénico de resistencia incompleta.

Coffea canephora - Café Robusta

'Robusta' El término es en realidad el nombre de una variedad cultivada de esta especie. Es un arbusto robusto o pequeño árbol que crece hasta 10 metros de altura, pero con un sistema de raíces poco profundas. Los frutos son redondeados y tienen un máximo de 11 meses para madurar, las semillas son de forma ovalada y más pequeñas que las de *C. arábica*. El café Robusta se

cultiva en África Occidental y Central, en el sudeste de Asia y en cierta medida en Brasil, donde se le conoce como Conillon (ICO, 2013).

Las hojas del Robusta son más grandes que las del arábica y puede continuar produciendo durante mucho tiempo, éste arbusto alcanza alturas entre 7 a 10 metros. Las cerezas del robusta son fácilmente identificables en comparación con la del arábica, ya que son más redondas y producen un café amargo, es apetecible en algunos mercados, pero no como el arábica, asimismo, se utiliza para realizar mezclas con el arábica (Kuit et al., 2004).

Con un 30% de producción mundial, el café Robusta se encuentra principalmente en África, Asia y Filipinas, de granos más diminutos que el arábica (de 5 a 8 mm), contiene de 1.4 a 2.5% de cafeína, por lo cual es utilizado para la elaboración de cafés solubles ya que una parte del contenido de cafeína se pierde en el proceso de industrialización. De sabor menos fino que el Arábica, obtiene menores precios en los mercados mundiales (Figueroa et al. 2007).

Una de las pocas diferencias que existen entre la V. Robusta y la V. arábica es que este es sembrado en tierra con altitudes relativamente bajas, tolera altas temperaturas y lluvias intensas, es más resistente a enfermedades y además exige mayor contenido de humedad en el suelo que el arábica (Clarke y Macrae 2012, p 5).

Coffea liberica - café Liberica

Las hojas del café liberica son grandes y más redondas que las de la especie Arábica y Robusta. Esta especie puede alcanzar alturas de 10 metros y su producción es baja, el café preparado con este grano es más amargo y ácido que las otras dos especies (Kuit et al., 2004).

El café Liberica crece como un árbol fuerte y grande, de hasta 18 metros de altura, con hojas coriáceas grandes. Los frutos y semillas (granos) son también grandes. El café Liberica se cultiva en Malasia y en el oeste de África, pero ya

que la demanda por sus características de sabor es baja, sólo cantidades muy pequeñas son objeto de comercio. (ICO, 2013)

Dependiendo del método utilizado para realizar el proceso de beneficio del café, Figueroa *et al.* (2007), mencionan que es posible obtener diferentes calidades, encontrándose las siguientes clasificaciones:

Café no lavado (o natural):

Es un proceso relativamente más sencillo y económico, pues después de que el grano es cosechado es llevado a planchones para iniciar la fase del secado. Este proceso de secado directamente al sol es practicado donde el clima es siempre seco seguido de la cosecha y donde la oferta hídrica es deficiente para realizar el proceso de lavado. La mayoría del café Robusta de hoy en día cultivado en Brasil es beneficiado de esta forma, esto se realiza en países como Brasil, Bolivia, Paraguay y Etiopía (Clarke y Macrae 2012, p 21).

El mismo autor menciona, que la profundidad de la capa de café empleando este método de secado al sol directamente no debe exceder los 5 centímetros, y es usual que se utilice un rastrillo para estar moviendo la capa de café y de esta forma el secado sea más uniforme.

Arábico lavado:

Una vez realizado el proceso de cosecha, inicia el proceso de beneficio húmedo donde el grano es llevado a una tolva en forma de embudo que conduce los granos a una máquina despulpadora, posteriormente se le retira la cáscara o cereza y el grano con el mucilago (baba) se deposita en unos tanques de fermentación, en este tanque se realiza el proceso de clasificación separando el grano menos denso por flotación.

En este tanque se ingresa agua para que se fermente con el mucilago, generalmente este proceso dura entre 14 y 18 horas dependiendo de las condiciones climáticas del lugar. Una vez finalizado este proceso de

fermentación, el agua es retirada y el café es nuevamente lavado para ser llevado a los secaderos de café. El grado de maduración del fruto es uno de los factores más influyentes en la calidad de la cosecha, así como en los factores de rendimiento en el beneficio y en la calidad de la taza (Arcila, et al. 2007).

El café se comercializa en 4 categorías, según la clasificación dada por la Organización Internacional del Café (ICO), estas son:

Suaves colombianos: Es una de las calidades de café más aceptadas en el mercado por su cuerpo, aroma y sabor suave. Por lo anterior se paga un sobreprecio o prima de calidad. se producen principalmente en Colombia, Kenia y Tanzania.

Otros Suaves: Hasta antes del año 2013 se reconocía este café como el segundo en cuanto a calidad y por eso su precio era inferior que el de los cafés suaves colombianos; pero, a partir del año 2014 esto cambió y el precio de los otros Suaves es el mejor pagado en el mercado. Una de las explicaciones a este fenómeno se debe principalmente a la reducción en la oferta de este tipo de café, ya que en el año 2013 y 2014 las plantaciones de café de México y Centro América fueron atacadas por la Roya. Los principales países productores son México, América Central, India, Nueva Guinea, Ruanda y Burundi.

En tercer lugar, en cuanto a calidad y precio pagado en el mercado se encuentran los naturales arábigos brasileños o lavados, los cuales no tienen las mismas características organolépticas de los primeros. En el año 2014 este tipo de café fue pagado en un 20% y 18% por debajo de los otros suaves y suaves colombianos respectivamente.

Finalmente, los cafés menos pagados por su calidad en el mercado son los Robustas cultivados principalmente en Vietnam y Brasil, este tipo de café es utilizado como base para realizar los cafés instantáneos.

Cafés Especiales

El mercado internacional del café es cada vez más competitivo, los cafés especiales ofrecen una excelente alternativa para los productores que buscan nuevos nichos de mercado (Wintgens, 2009, p 340).

“La denominación de Cafés Especiales es relativamente nueva. Nació a comienzos de la década de los 60’s, como una respuesta a los consumidores de café de los Estados Unidos, que buscaban una bebida de mayor calidad en un mercado donde el producto se encontraba homogeneizado” (Arcila, et al. 2007, p 234).

Los más importantes tipos de cafés especiales actualmente en el mercado internacional pueden clasificarse de la siguiente forma:

Café de origen: Son aquellos que proviene de un país, región o finca con un sinnúmero de cualidades que los hacen únicos de acuerdo a la oferta ambiental donde se encuentran, además se venden al consumidor final garantizando que no se ha realizado ninguna clase de mezcla. Entre los cafés de origen más famosos se encuentran el Blue Mountain de Jamaica, el Pluma Hidalgo de México, el Kona de Hawai, Moca de Yeman, Java, Sumatra y Celebese de Indonesia, Sidamo de Etiopía, Terrazu y tres ríos de Costa Rica, Antigua de Guatemala y Supremos de Colombia Etc. (Arcila, et al 2007, p 235; Wintgens, 2009, p 340)

Cafés Puros: Es Café que proviene de una sola variedad de café, ya sea Arábica o Robusta, Al igual que el café de origen se debe garantizar que no se ha realizado mezclas (Wintgens, 2009, p 340).

El mismo autor menciona los Café de mezclas especiales: satisfacen el gusto de un mercado particular, el cual puede ser empleado en un desayuno o después de una Comida especial.

Cafés descafeinados: Son aquellos que son sometidos a procesos industriales en el cual se extrae la cafeína, este tipo de cafés tiene una participación del 10% de los cafés especiales. Aunque la venta de este tipo de café había permanecido estática, ha empezado a aumentar, aproximadamente el 10% de la producción mundial del café es descafeinado, y en algunos países de Europa las importaciones de café descafeinado están alrededor de 20% (Arcila, et al 2007, p 235; Clarke y Macrae 2012, p 31).

Cafés saborizados: Son aquellos tipos de cafés que durante o después del proceso de torrefacción se le adicionan algunas sustancias aromáticas (resinas) con sabores, tales como chocolate, vainilla, cardamomo, nuez, o fresas entre otras. Este tipo de cafés es considerado el mejor en la línea de los especiales, pues con este se busca la que las nuevas generaciones incursionen en este mercado, además, tiene una participación del 40% del mercado de los cafés especiales (Arcila, et al 2007, p 235; Wintgens, 2009, p 341).

Así mismo, Arcila et al, (2007) mencionan en la página 235 que los Cafés de Alta tostión: son aquellos cuyo grado de tostión es superior al normal; y están destinados a los mercados de los cafés expresos y capuchinos. Este tipo de cafés, tiene una participación del 15% en el mercado de los cafés especiales.

Finalmente, se tiene el mercado de los Cafés orgánicos: los cuales tienen que estar libres de contaminantes (Agroquímicos) y cumplir los requisitos de la Federación Internacional de Movimientos de agricultura orgánica (IFOAM). Este tipo de cafés es vendido con la certificación de alguna Institución de reconocimiento internacional, y participan con un 5% en el mercado de los cafés especiales, pero tendrá una mayor participación en el futuro, debido a la tendencia que está adquiriendo el mercado de productos orgánicos (Arcila, et al 2007, p 235).

2.3.3 La organización internacional del café

La Organización Internacional del Café (ICO), se fundó en 1963 con el auspicio de las Naciones Unidas, con el objetivo de ayudar a regular el mercado del café pues se había caracterizado por grandes fluctuaciones en la producción y precio (Leavitt, 2009).

El órgano directivo y máxima autoridad de la ICO, es el Consejo Internacional del café, que está integrado por todos los países miembros. Cada país tiene un representante en el consejo. Se reúnen en marzo y septiembre para discutir temas cafeteros y proyectos estratégicos (Figuerola et al., 2007, 118p; ICO, 2016a). Para el año cafetero 2015/16 el Consejo Internacional del café tiene como presidente a Iván Romero Martínez de Honduras y como vicepresidente a Sra. Tanya Menchi de Estados Unidos (ICO, 2016b).

El mismo autor manifiesta que desde el Acuerdo Internacional del café de 2007 hasta el 14 de diciembre de 2015, la Organización Internacional del café está constituida por 42 miembros exportadores y 8 miembros importadores; es importante mencionar que dentro de estos últimos se encuentran 28 países que componen la Unión Europea.

Los Convenios internacionales del café

La Organización Internacional del Café se estableció en 1963, a raíz de la entrada en vigor en 1962, del primer Convenio Internacional del Café por un período de cinco años, y viene funcionando desde entonces al amparo de sucesivos Convenios. Fueron éstos el Convenio Internacional del Café de 1968 y sus dos prórrogas, el Convenio Internacional del Café de 1976 con una prórroga, el Convenio Internacional del Café de 1983 y sus cuatro prórrogas, el Convenio Internacional del Café de 1994 con una prórroga, el Convenio Internacional del Café de 2001 con cuatro prórrogas y el Acuerdo más reciente,

es el de 2007, fue aprobado por el Consejo en septiembre de 2007 y entró en vigor definitivamente el 2 de febrero de 2011. (ICO, 2016b)

La Organización Internacional del Café (ICO), fue creada en la década de los sesenta con una participación de 75 países de los cuales 25 eran consumidores y 50 productores de café, utilizando como procedimiento operativo la realización de acuerdos que permiten a los productores miembros, diseñar sobre bases firmes políticas de aumento a la producción del grano (Figueroa et al., 2007).

Además, la ICO se reúne con los países exportadores e importadores para resolver, mediante la cooperación internacional, los desafíos con que se enfrenta el sector cafetero mundial. Los gobiernos miembros de la ICO representan el 95% de la producción mundial y más del 83% del consumo mundial de café. (ICO, 2016c)

A través de la ICO se administraba el Convenio Internacional de Café (CIC), el cual buscaba alcanzar un equilibrio entre la oferta y la demanda del grano y de esta manera se garantizaría un precio justo para los productores. Después de firmado el CIC de 1962 se registraron tres renovaciones más en 1968, 1976, y 1983 (Figueroa et al., 2007).

Con los convenios internacionales del café de 1962 y 1968, se logró un relativo equilibrio entre la oferta y la demanda del grano, con estabilidad de precios entre 1963 y 1972. Asimismo, contribuyeron a fortalecer las economías de los países productores. Pero el desequilibrio entre la oferta y la demanda, provocó la crisis del sistema de cuotas en 1973 y el convenio de 1968 fue prorrogado, pero desprovisto de todas sus disposiciones de carácter económico. (ICO, 2015d)

Para el Convenio internacional del café de 1976 se plantearon algunas dudas en cuanto a la capacidad de oferta para satisfacer la demanda de los consumidores debido a una fuerte helada en julio de 1975, la cual ocasionó

daños en las plantaciones de café y redujo la producción del grano en Brasil en un 70% para el año de 1976 y del 23% para 1977. (FAO, 2014; ICO, 2015d).

Una de las principales novedades del Convenio de 1976 consistió en estipular la suspensión de cuotas en caso de excesivas alzas en el precio y su restablecimiento en caso de baja excesiva. En virtud de ese sistema se implantó el régimen de cuotas en 1980. La experiencia del Convenio de 1976 proporcionó una sólida base para la negociación del cuarto Convenio, que entró en vigor en 1983. (ICO, 2015d).

El Convenio internacional del café de 1983 se firmó en septiembre; en él, se respetarían la mayoría de las cláusulas de los convenios anteriores y se preveía una cuota global de 60 millones de sacos. Pero a finales de 1983 y principios de 1984, 1 millón de sacos fueron liberados a causa de una nueva tendencia al alza del precio del aromático. Ya que, la cotización del grano se estaba alejando de la banda establecida para el sistema de cuotas de 120 a 140 centavos de dólar por libra. Sin embargo, en 1985 hubo en dos ocasiones un recorte de 1 millón de sacos y para Colombia significó una pérdida de 30 millones de dólares (Figuerola et al., 2007, 137p).

La existencia de un mercado de café fuera del sistema de cuotas establecido en los convenios internacionales del café y una sobreoferta del grano en la década de los ochenta, hizo que en 1989 los países miembros no lograran ponerse de acuerdo en renovar el convenio y se dejó que el precio del mercado del aromático fuese determinado por la ley de la oferta y la demanda.

Acercándose la fecha de terminación del último convenio (septiembre), aumentaron los rumores sobre su no renovación y la eliminación de las cuotas, lo que generó una drástica disminución del precio del grano, pues en julio de 1989 se redujo más de 26% su valor con respecto a junio de ese mismo año y más de 32% respecto a julio del año anterior.

Fueron casi 5 años en los cuales el precio del aromático estuvo por debajo de los 100 centavos de dólar por libra, hasta que se propuso nuevamente un esquema de retención del grano; propuesta hecha inicialmente por los países productores de Sur América. Esta consistía en retener solo un 15% de la producción exportable, sin embargo, la buena respuesta al esquema permitió proponer una cifra de 20% permitiendo a los países productores, mejorar sus ingresos debido a las nuevas cotizaciones del grano y de esta manera obligaban a los países importadores consumir las existencias que habían conseguido en los años de bajos precios.

En septiembre de 2007, los 77 países miembros de del Consejo Internacional del café aprobaron el acuerdo internacional del café 2007, con el objetivo de fortalecer el sector cafetero mundial y promover su expansión sostenible basado en el mercado para beneficio de todos los participantes de esta actividad. De igual forma, el Acuerdo fortalecerá las funciones de la ICO como foro para consultas intergubernamentales, facilitará el comercio internacional mediante al aumento de la transparencia y del acceso a la pertinente información, y fomentará una economía cafetalera sostenible en beneficio de todos los interesados y, en especial, de los pequeños caficultores en los países productores de café (ICO, 2015d).

2.3.4 Comercio internacional del café

Está constituido por todos los países importadores y exportadores de café, los cuales están divididos en miembros y no miembros de la Organización Internacional del Café.

Las importaciones realizadas por los países importadores miembros de la ICO entre diciembre de 2012 y noviembre de 2013 sumaban alrededor de 112 millones de sacos de 60 kilogramos. Los cinco países más importantes por su participación relativa en la importación del mercado del café en este periodo fueron: Estados Unidos de América, Alemania, Italia, Japón y Francia (Cuadro 4) (ICO, 2016d).

Cuadro 4. Importaciones de café por los países miembros de ICO en 2013

País	Sacos 60 Kilogramos	Participación en las Exportación
Estados Unidos	27.016.000	23,5%
Alemania	21.174.000	18,4%
Italia	8.834.000	7,7%
Japón	8.381.000	7,3%
Francia	6.713.000	5,8%
Bélgica	5.502.000	4,8%
España	5.137.000	4,5%
Reino Unido	4.206.000	3,7%
Total	86.963.000	75,7%

Fuente: Elaboración propia con datos de ICO, 2016

Por otra parte, las importaciones realizadas por los países no miembros de la ICO sumaron 33 millones de sacos para el año 2013, destacándose la participación relativa de Canadá con 13.7% y Rusia con 13.1% (Cuadro 5).

Cuadro 5. Importaciones de café por los países no miembros ICO en 2013

País	Sacos de 60 Kilogramos	Participación en las Exportación
Canadá	4.520.000	13,7%
Rusia	4.520.000	13,1%
República de Corea	4.329.000	6,5%
Argelia	2.141.000	6,4%
Malasia	2.125.000	5,9%
Total	1.957.000	45,7%

Fuente: Elaboración propia con datos de ICO, 2016

Oferta mundial del café

La oferta del café es la suma de la producción de un año cafetero determinado, más las existencias de arrastre procedentes del año anterior, menos el consumo interno de los países productores (Figuroa et al., 2007).

A nivel internacional el volumen exportable de café disminuyó en 3.30% entre el año 2013 y 2014. Los principales productores que se destacaron por su

participación relativa en el mercado fueron; Brasil, Vietnam, Colombia, e Indonesia (Cuadro 6).

Cuadro 6. Oferta Mundial de café 2013-2014

Países Productores	miles de sacos de 60 Kg.	
	2013	2014
Brasil	29.067	25.306
Vietnam	25.500	24.300
Colombia	10.655	11.839
Indonesia	7.282	6.198
Honduras	4.223	5.055
Uganda	3.412	3.515
India	2.975	3.250
Guatemala	2.819	2.948
Etiopia	2.877	2.950
Perú	4.088	2.633
Inventarios países importadores	18.790	22.020
Volumen total exportable	104.577	99.040
Oferta mundial del café	123.367	121.060

Fuente: Elaboración propia con datos de ICO, 2016

Pelupessy (2001) manifiesta que, “las variedades comerciales más importantes y cuyos precios de café fluctúan de valores inferiores a superiores, están agrupados en Robusta (35% del volumen mundial de exportaciones 1997-2002), Naturales Brasileños (24%), Otros Suaves (27%) y Suaves Colombianos (14%)”.

Desde la ruptura del convenio internacional del café en septiembre de 1989 y las nuevas plantaciones de café sembradas en Vietnam se han generado fuertes cambios en el precio del café, empezando por presiones a la baja por sobreoferta del grano. De igual forma, precios elevados, ocasionados, por las condiciones climáticas adversas en las zonas cafetaleras de los países productores del aromático.

Entre 1989 y 2014 se resaltan dos grandes periodos donde el precio promedio mensual del café suave colombiano (ICO) estuvo por debajo de los 100

centavos de dólar por libra; el primer periodo inicia en octubre de 1990 y finaliza en abril 1994. Y el segundo periodo inició en agosto del 2000 y finalizó el mes de noviembre del 2004 (ICO, 2016e).

La recuperación del precio promedio del café suave colombiano por encima del dólar por libra, inició el mes de mayo de 1994, debido a las condiciones climáticas desfavorables en la zona cafetalera brasileña registrándose heladas y sequías entre graves y muy graves en los meses de junio y julio. Estas condiciones climáticas redujeron en un 36% la oferta del aromático en Brasil y en 7% en el mundo para el año cafetero de 1995 (INMET, 2015).

La segunda caída del precio del café en 1999 se origina por una inesperada y gran cosecha en Brasil y Vietnam que inundaron el mercado de café, aunque los especuladores habían hecho predicciones de baja productividad para ese año (Tucker, 2011).

En 1999, Brasil incrementó en 29.4% su producción, pasando de producir 36.76 a 47.57 millones de sacos de 60 kilogramos; debido a nuevas áreas sembradas después de unas devastadoras heladas a mediados de los 90s. Asimismo, Vietnam inunda el mercado del café Robusta, pasando de producir 7.05 millones de sacos en el año de 1998 a 11.63 millones de sacos de 60 kilogramos en 1999. Por lo anterior, los precios internacionales del café cayeron estreptosamente hasta llegar por debajo de su precio de producción (ICO, 2016f; Tucker, 2011, 113p).

Este periodo fue difícil para los cafeteros y recolectores que vivían de esta actividad, incluso algunos de ellos abanaron sus cultivos, otros migraron del campo a la ciudad buscando fuentes de empleo para poder sobrevivir. En Guatemala y Etiopía, por ejemplo, se reportan muertes de inanición por el deterioro de las condiciones económicas de las familias cafetaleras, y las agencias internacionales para el desarrollo vieron como la pobreza y malnutrición incrementaba en estos países, incluyendo a Vietnam donde se

había promovido el cultivo del café como un medio para reducir la pobreza (Tucker, 2011, 113p).

Una buena floración ocurrida en octubre del 2013 auguraba una gran oferta de café para el año 2014, situación que presionó nuevamente a la baja el precio del café suave colombiano, y entre el primero de octubre y 31 de diciembre del 2013, el precio máximo y mínimo registrado fue 1.34 y 1.20 dólares por libra respectivamente, Asimismo, la Compañía Nacional de Abastecimientos (CONAB) publicó en enero del 2014 sus estimaciones sobre la cosecha brasilera y pronosticaba una cosecha entre 46.53 y 50.15 millones de sacos, lo que mantuvo el precio del café a los niveles mencionados anteriormente (Café Colombiano, 2015; CONAB, 2014).

Sin embargo, un gran periodo de sequía iniciado a finales del año 2013 y prolongado al 2014 sobre la zona cafetalera brasileña, hacer reaccionar el precio del café suave colombiano al alza en la bolsa de valores de New York, los temores de una reducción de la oferta del aromático era desconocido, hasta que el CONAB en su informe de mayo manifestó que la cosecha para el año 2014 tendría una reducción de 4.58 millones de sacos situando la cosecha brasilera en 44.57 millones de sacos de 60 kilogramos (CONAB, 2014).

Del primero de mayo hasta el 20 de octubre del 2014 el café suave colombiano alcanzó un precio máximo y mínimo de 2.38 y 1.84 dólares por libra respectivamente, debido a la disminución de la oferta internacional del aromático. (Café Colombiano, 2015; CONAB, 2014).

El precio del café inicia su ascenso en el año 2014 debido a una no anticipada caída de la oferta mundial del café por una de las peores sequias en Brasil, el mayor productor de café (Fridell, 2014).

Basado en lo anterior, la volatilidad del mercado del café se debe principalmente a dos factores relacionados con la producción. El primero es, que la oferta de café a nivel mundial puede cambiar significativamente, debido a

factores medioambientales extremos en zonas cafetaleras, principalmente en Brasil. El segundo factor, es relacionar la oferta y la demanda del grano, teniendo en cuenta, el tiempo que transcurre desde el momento de la siembra hasta el momento de la primera cosecha. La combinación de estos dos factores origina el ciclo del café. (Tucker, 2011, 113p).

El mismo autor añade, que en el momento que la oferta sobrepasa la demanda los precios caen en picada y los productores disminuyen su productividad, con el tiempo la demanda sobrepasa la oferta, los precios suben y los productores incrementan su área productiva hasta inundar nuevamente el mercado y de esta forma el ciclo se repite.

El 15 de enero del año 2015 la Compañía Nacional de Abastecimiento en Brasil (CONAB), publicó la primera estimación de la cosecha cafetalera entre 44.11 y 46.61 millones de sacos, debido a bajas precipitaciones sobre la zona cafetalera brasilera, lo cual mantuvo el precio del café suave colombianos en mercado de futuros de Nueva York por encima de los 160 centavos de dólar por libra hasta el 24 de febrero del 2015.

Las precipitaciones en la zona cafetalera de Brasil juegan un papel importante en la formación del precio del aromático en el mercado internacional, ya que, una vez iniciado el periodo de lluvias a mediados de enero del 2015, se ejerció una fuerte presión a la baja del precio de todos los cafés en los mercados de futuro de Nueva York y Londres; provocando una reducción del 23% del precio del café suave colombiano entre el 15 de enero al 30 de marzo del 2015 (Figura 2) (Café Colombiano, 2015; INMET, 2015).

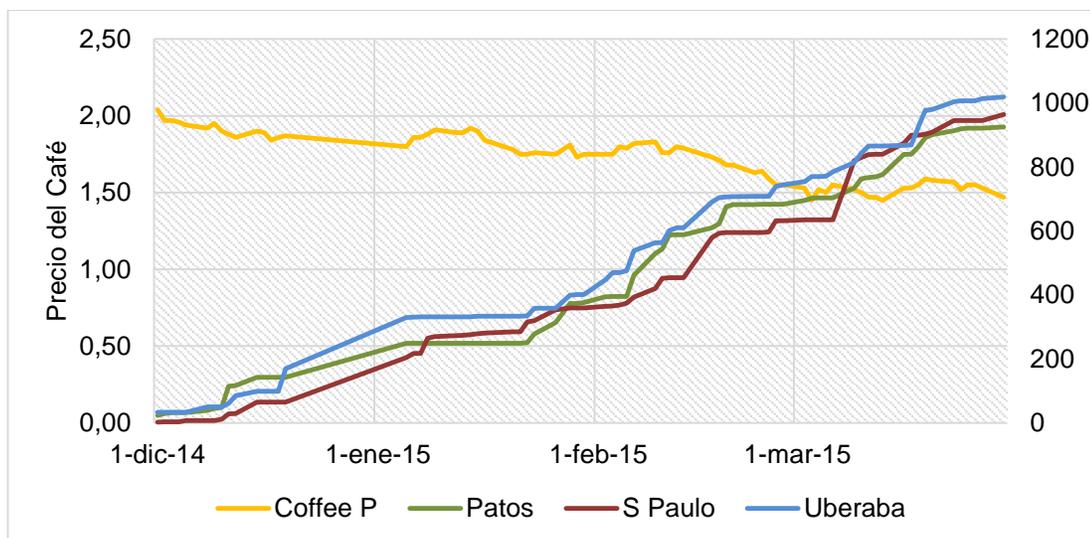


Figura 2. Precipitación en Brasil y su relación con el precio del café suave colombiano.

La comercialización del café en todas sus formas es tan buen negocio que los países importadores miembros de la ICO lo reexportan. Por ejemplo, en el año 2013 se reexportaron 35.57 millones de sacos de 60 kilogramos, de los cuales se destacó la participación relativa de Alemania con un 33.8%, Bélgica con un 12% y Estados Unidos de América con un 9.4% (Cuadro 7). El volumen de reexportación realizado por Alemania en el año 2013 fue tan significativo que reexportó más que el café exportado por Colombia y Costa Rica, en ese mismo año (ICO, 2016g).

Cuadro 7. Reexportación Mundial de café 2013

Países	Reexportación Miles sacos 60 kg.	Participación en el mercado	Importación Miles sacos 60 kg.	Porcentaje Reexportado / importaciones
Alemania	12.020	33,8%	21174	56,8%
Bélgica	4.257	12,0%	5502	77,4%
Estados Unidos	3.360	9,4%	27016	12,4%
Italia	3.182	8,9%	8834	36,0%
España	1.636	4,6%	5137	31,8%
Holanda	1.781	5,0%	3407	52,3%
Polonia	1.615	4,5%	3284	49,2%
Total	35.571			

Fuente: Elaboración propia con datos de ICO, 2016

Asimismo, se puede destacar que algunos países reexportan más del 50% del café que importan, como fue el caso de Bélgica quien reexportó 77.4% seguido por Alemania con 56.8% y finalmente Holanda reexportó el 52.3% del café importado (Cuadro 7).

Demanda mundial del café.

El consumo interno de los países productores en 2012 se estimó en 43.3 millones de sacos de 60 kilogramos, lo que supone un aumento de 592 mil sacos con respecto al año anterior; de estos países se destaca Brasil en el consumo interno del aromático, pues ha tenido un incremento de 280 mil sacos, pasando de 19.72 millones en el año cafetero 2011/12 a 20 millones de sacos en el periodo 2012/13; lo que representa un 46% del consumo total de los países productores y 17.2% del consumo mundial.

De los países importadores miembros de la ICO en el año 2013 se destaca el consumo per cápita de café en Alemania con 6.81 kilogramos, seguido por Bélgica con 6.68 kg. Y finalmente, Reino Unido con 6.55 kilogramos (Cuadro 8). Sin embargo, Brasil el mayor productor mundial del aromático, figura de cuarto como uno de los países con mayor consumo per cápita de café.

Cuadro 8. Principales países consumidores de café año 2013

País	Consumo café miles de sacos 60 Kg.	Población	Consumo per cápita (kg).
Alemania	9.154	80.645.605	6,81
Bélgica	1.245	11.182.817	6,68
Reino Unido	7.001	64.106.779	6,55
Brasil	20.085	204.259.377	5,90
Holanda	1.626	16.804.432	5,81
Italia	5.652	60.233.948	5,63
Francia	5.699	65.925.498	5,19
España	3.501	46.620.045	4,51
Estados Unidos	23.656	316.497.531	4,48

Fuente: Elaboración propia con datos de ICO, 2016 y Banco Mundial 2016

Comercialización del Café

Fitter (2001) Menciona que después de finalizado el Convenio Internacional del Café de 1989, la comercialización del café verde en el mundo ha estado controlada por las siguientes cinco compañías: Rothfos, E.D.& Mann, Volcafe, Cargill y Aron; el mismo autor reporta, que estas compañías en el año 1989 tenían una participación en la comercialización del café verde en el mundo del 36.4% y seis años más tarde ya controlaban el 46% (Ver Cuadro 9).

Cuadro 9. Comercialización de Café verde en el Mundo.

Compañía	M. S. [†] 1989	PPM [‡] 1989	M. S. 1993	PPM 1993	M. S. 1995	PPM 1995
Neumann Rothfos	9.0	12.6%	9.0	12.4%	12.0	18.1%
E.D. & F. Man	5.0	7.0%	6.0	8.3%	5.0	7.5%
Volcafe	4.0	5.6%	7.0	9.6%	6.5	9.8%
Cargill	4.0	5.6%	5.5	7.6%	3.5	5.3%
Aron	4.0	5.6%	3.5	4.8%	3.5	5.3%
Total, de las 5 Empresas	26.0	36.4%	31.0	42.7%	30.5	46.0%
Total, en el Mundo	71.40	100.0%	72.60	100.0%	66.30	100.0%

Fuente: Modificado de Fitter, 2001.

†: Millones de Sacos de 60 Kilos

‡: Participación Porcentual en el mercado Mundial del café verde

Ponte (2002), manifiesta que el mercado mundial del café verde se ha vuelto cada vez más concentrado, pues en 1998, las dos empresas más grandes (Rothfos y Volcafe) controlaban el 29% del total del mercado y las seis principales empresas controlan el 50%.

La tradicional compañía Volcafé en Winterthur, ya no es propiedad de suizos. Sin embargo, sus nuevos propietarios, los ingleses ED&F Mann, continúan operando su negocio desde Winterthur. Cuando se fusionó Volcafe con su propio negocio de café en el 2004, crearon la mayor comercializadora de café verde en el mundo, con ingresos de 1.5 billones de francos suizos, según la agencia suiza SDA. Hoy, las ventas de Volcafe se estiman en 12 millones de sacos de 60 kilos y pone a la compañía en segundo lugar por debajo del grupo

Neumann en Hamburgo, que también comercializa en Suiza, a través de su filial Bernhard Rothfos Intercafé (Berne Declaration, 2011).

Ponte (2002) afirma que el nivel de concentración en el mercado de café tostador ha llegado a un grado aún más alto que el de los comercializadores de café verde a nivel internacional, ya que las dos principales empresas tostadoras (Philis Morris y Nestlé) controlan el 49% del mercado mundial del café tostado e instantáneo y las 5 principales empresas controlan el 69% del mercado (Cuadro 10).

Cuadro 10. Principales empresas torrefactoras a nivel mundial en 1998

Grupo	Filiales	PEM [†]
Philip Morris	Jacobs - Suchard	25.0%
	General Food	
Nestlé	Nestlé	24.0%
Procter & Gamble	Folger's	7.0%
Sara Lee	Dowgbe Egbert	7.0%
Tchibo		6.0%
Otros		31.0%

Fuente: Citado en Ponte 2002, de van Dijk et al, 1998.

†: Participación de las empresas en el mercado de café tostado e Instantáneo

Estas cinco grandes empresas tostadores comercializan y controlan muchas marcas de café, por ejemplo, Nestlé lo hace con sus marcas Nescafé y Nespresso, con las cuales es líder en muchos mercados. Pero el control de estas empresas no se limita solo a la comercialización del café, ya que tiene un incontable manejo de productos en el mercado mundial en el cual poseen un inmenso peso económico. Nestlé la empresa de alimentos más grande del mundo para el año 2012 poseía activos valorados en 120 billones de dólares más o menos, el equivalente al producto interno bruto de Vietnam, el segundo exportador mundial de café con 88 millones de habitantes (Fridell, 2014).

Basado en lo anterior, la comercialización del café en nada se parece al mercado de libre competencia, y en ausencia de las clausulas económicas del café (CIC) los precios no están determinados solamente por la oferta y la

demanda, sino también por el poder oligopólico de los negociantes internacionales y los torrefactores (Santoyo et al., 1994).

La comercialización del café en el mundo se ha dado, desde 1962, regulada por un Convenio Internacional del café (CIC) entre los países productores y los países consumidores dentro de la Organización Internacional del Café (ICO). A través de convenios que dentro de la ICO se emanan, han tratado de eliminar la gran inestabilidad que existe en el mercado de café; inestabilidad debido al casi constante exceso de la oferta del grano con respecto a la demanda y a cambios bruscos en la producción del primer productor mundial (Brasil), provocadas por factores climáticos (Figueroa et al., 2007).

Una característica clave del mercado mundial del café ha sido las fuertes fluctuaciones a corto plazo en los precios, tanto a nivel de los mercados internacionales y en los mercados de referencia para los productores, lo que los expone a altos niveles de riesgo de los precios (Mohan, 2007).

El mismo autor añade que los productores se enfrentan a tres riesgos principales en la producción y comercialización del café: primero el riesgo de volatilidad de los precios, segundo riesgos de la producción o incertidumbre de la producción, y por último el riesgo debido a las fluctuaciones en la tasa de cambio. Los productores no se preocupan por los riesgos per se, pero son importantes para ellos en la medida que estos afecten sus ingresos.

Competencia Imperfecta

Analizando el mercado del café verde y tostado desde la parcela hasta las empresas torrefactoras, la estructura del mercado que domina este sector productivo, es el oligopsonio, teniendo en cuenta que éste a su vez está regido por la ley de oferta y demanda.

El oligopsonio es una forma de competencia imperfecta, y se considera que hay oligopsonio cuando el número de compradores es muy reducido y éstos se imponen a los vendedores, lo que les permite influir sobre el precio (Zorrilla y

Méndez, 2011). Para el caso específico de Colombia, existen cooperativas de caficultores, las cuales hacen parte de la Federación Nacional de cafeteros de Colombia (empresa de los productores) y uno de sus objetivos es regular el precio interno de compra para que los intermediarios del café no ejerzan tanto control sobre el mismo.

2.3.5 Estructura de mercado en el precio de los productos agrícolas

Berne (2011) manifiesta que, el mercado de productos agrícolas está liderado por 4 empresas a menudo reconocidas como el club ABCD o la banda de los cuatro, los cuales marcan la pauta a nivel mundial. Ellos son: Archer Daniels Midland (ADM), Bunge, Cargill y Dreyfus. ADM y Bunge cotizan en la Bolsa de Valores, Cargill y Louis Dreyfus todavía son en su mayoría propiedad familiar (Cuadro 11).

El mismo autor añade que, estas cuatro gigantes empresas en el 2010, generaron ingresos alrededor de 290 billones de dólares. El primer lugar es ocupado por Cargill con más de 100 millones de dólares. De acuerdo con el grupo consultor de Boston en el año 2003, estas cuatro empresas controlaban las tres cuartas partes del comercio mundial de cereales y oleaginosas.

Los precios altos de los productos agrícolas alcanzados por el factor especulación tienen dos efectos; el primero de ellos es subir el precio de los bienes finales que utilizan productos agrícolas para obtener una mayor tasa de ganancia. El segundo efecto es psicológico y éste se provoca sobre los productores de dichos commodities, los cuales basados en ese aumento de precios incrementan su capacidad productiva, creando una sobreoferta de estos productos y posteriormente la caída de los precios. Situación que sólo beneficia a las grandes empresas que lograron subir el precio de los productos finales, y pueden adquirir materias primas más baratas.

Cuadro 11. Perfil del grupo ABCD o banda de los Cuatro.

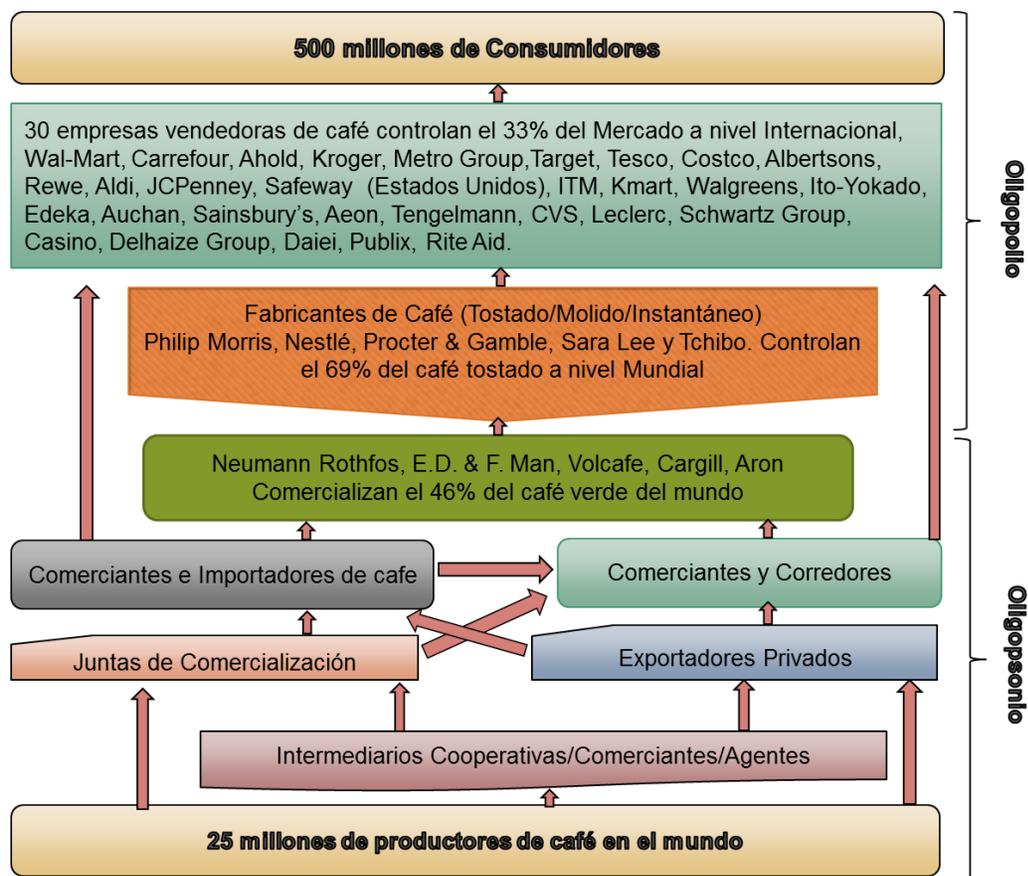
Empresas	Ingresos 2010 (billones de dólares)	Beneficios 2010 (billones de dólares)	Empleados		Productos Comercializados		Opera en (Número de países)
			Total	Suiza	Productos Agrícolas	Otros	
ADM	61.7	1.93	29000	160	Granos (Cereales), Oleaginosas, Maíz y Cocoa	Etanol Biodiesel	60
Bunge	45.7	2.35	25000	250	Granos (Cereales), Oleaginosas, Maíz y Azúcar	Fertilizantes, Etanol, Emisiones, y Certificados	30
Cargill	107.9	2.6	131000	900	Granos (Cereales), Oleaginosas, Maíz, Azúcar, Algodón y Cocoa	Electricidad Petróleo Gas natural carbón Certificados Cargas Pesadas	66
Dreyfus	74.3	1.21	34000	250	Granos (Cereales), Oleaginosas, Maíz, Frutas Cítricas, Algodón, Café Cocoa y Azúcar	Etanol Metales Cargas Pesadas Electricidad	53

Fuente: Reportes anuales, Company websites, Citado por Berne Declaration, (2011)

Estructura de mercado del café verde y tostado

Para la determinación del precio en los productos agrícolas se suponen un mercado de competencia perfecta donde no se consideran acumulaciones o existencias del producto, sin embargo, en el caso del café se presentan periodos con almacenamientos (inventarios) y existe diferenciación del producto, asimismo, más del 50% del mercado del café verde, tostado y soluble

es controlado por pocas empresas, lo cual está lejos de ser un mercado de competencia perfecta (Figura 3).



Fuente: Modificado de Talbot, J M (1997) y FAO (2004)

Figura 3. Estructura del mercado mundial del café

El café de la especie Arábica es el más apreciado en el mercado por su aroma y suavidad, en comparación con el café de la especie Robusta. La industria torrefactora ha invertido dinero en investigaciones para lograr que el café Robusta se aproxime a la calidad del Arábica, mediante procesos industriales. Asimismo, han realizado diferentes mezclas entre estas dos especies y han determinado la cantidad exacta que más es demanda por los consumidores; de esta forma, enfrenta la escasez de café Arábica en el mercado.

La distribución porcentual de los ingresos que dejó el negocio del café como valor agregado en el periodo comprendido entre 1971 y 1993 fue el siguiente:

Aumentó a favor de los países consumidores, disminuyó para los países productores así, como el costo del transporte del grano (Talbot, 1997). Finalmente, el pago porcentual realizado a los productores fluctuó debido a los desequilibrios entre la oferta y la demanda del grano (Cuadro 12).

Cuadro 12. Distribución de los Ingresos del café

Tiempo (Año)	1971	1975	1980	1985	1990	1993
Venta al por menor	123.22	183.72	417.27	429.6	439.2	452.9
	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Valor Agregado en Países consumidores	71.54	108.3	215.85	228.9	344.8	345.4
	58.1%	58.9%	51.7%	53.3%	78.5%	76.3%
Costo del Transporte	13.94	20.78	53.63	43.1	27.2	19.7
	11.3%	11.3%	12.9%	10.0%	6.2%	4.3%
Valor Agregado en Países Productores	15.27	15.14	70.43	60	17.7	11.5
	12.4%	8.2%	16.9%	14.0%	4.0%	2.5%
Precio pagado al Productor	22.47	39.5	77.3	97.6	49.5	76.3
	18.2%	21.5%	18.5%	22.7%	11.3%	16.8%

Fuente: Citado por Talbot, J.M. (1997)

2.4 Series de tiempo y modelos de predicción

Una serie temporal, es una sucesión de observaciones medidas en diferentes instantes de tiempo, la cual puede ser clasificada como una serie estacionaria o no estacionaria con comportamiento lineal o no lineal. La serie estacionaria, es aquella en la cual la esperanza matemática y varianza de los datos observados se mantienen constantes a lo largo del tiempo, por el contrario, las series no estacionarias son aquellas en las cuales la esperanza matemática y la varianza cambian a lo largo del tiempo.

Las predicciones juegan un papel crucial en los negocios, industrias, gobierno e instituciones encargadas de la planeación, debido a que muchas decisiones dependen de los valores futuros de ciertas variables (Pankratz, 2009, p 3).

La serie temporal de la producción mundial del café y el precio del café suave colombiano, son series no estacionarias, y para realizar pronósticos con este tipo de series, es necesario utilizar metodologías adecuadas; los modelos de redes neuronales y los autorregresivos integrados de media móvil, son ampliamente utilizados para este tipo de series.

2.4.1 Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Breve reseña Histórica

La historia de las redes neuronales se inicia con el científico aragonés Santiago Ramón y Cajal, descubridor de la estructura neuronal del sistema nervioso. En 1888 Ramón y Cajal demostraron que el sistema nervioso en realidad estaba compuesto por una red de células individuales, llamadas neuronas, ampliamente interconectadas entre sí. Asimismo, reveló que la información fluye en las neuronas desde las dendritas hacia el axón, atravesando el soma (Martín del Brío y Sanz 2007).

La visión moderna de las redes neuronales comenzó en el año de 1940 con el trabajo de Warren McCulloch y Walter Pitts, quienes mostraron que las redes de neuronas artificiales podrían, en principio, aproximar cualquier función aritmética o lógica. Su trabajo es a menudo reconocido como el origen del campo de las redes neuronales (Hagan *et al.*, 1996).

Aunque la idea de las redes neuronales fue propuesta hace más de 50 años por McCulloch y Pittis, el desarrollo de las técnicas de las redes neuronales experimentó un renacimiento hasta 1982, gracias a los esfuerzos de Hopfield en las redes autoasociativas (Govindaraju, 2000).

Arquitecturas de las redes

En las redes neuronales las neuronas o nodos se conectan por medio de sinapsis, estas conexiones sinápticas son direcciones. Por lo general las neuronas se agrupan en capas y se distinguen tres tipos: la capa de entrada en

contacto con los datos, capa oculta que recibe la información de la capa de entrada; finalmente, la capa de salida es aquella cuyas neuronas proporcionan el resultado de la red neuronal (Martín del Brío y Sanz 2007).

En general, se identifican tres clases fundamentales de arquitecturas: la red de una sola capa en dirección hacia adelante algunas veces llamadas unidireccionales (Single-Layer Feedforward Network); la red multicapa en una sola dirección, generalmente presenta una o más capas ocultas (Multilayer Feedforward Network). Finalmente, las redes recurrentes o realimentadas, en las cuales las salidas ingresan como entradas (Figura 4) (Haykin, 1994).

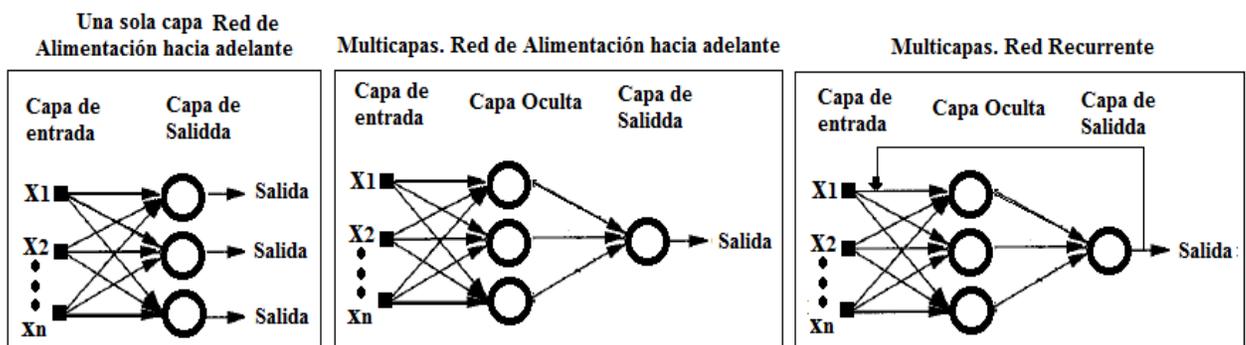


Figura 4. Arquitecturas más comunes en las redes neuronales

Modelo de una Neurona.

Una neurona es la unidad de procesamiento de la información que es fundamental para las operaciones de una red neuronal (Haykin, 1994). Los elementos que constituyen una neurona son: Un conjunto de entradas, los pesos sinápticos, una regla de propagación, una función de activación y la función de salida (Martín del Brío y Sanz 2007).

En la Figura 5, se muestra la j -ésima neurona donde las entradas pueden venir de un sistema causal de variables o salidas de otros nodos, dependiendo de la posición en la que se encuentre localizado (Govindaraju (2000).

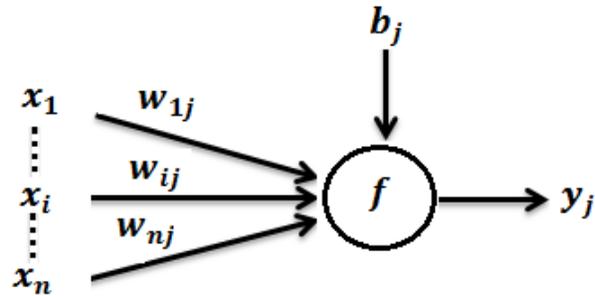


Figura 5. Diagrama de nodos

La Figura 5, puede escribirse en términos matemáticos con las siguientes ecuaciones:

$$u_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} * x_i \tag{1}$$

Y

$$y_j = f(u_j + b_j) \tag{2}$$

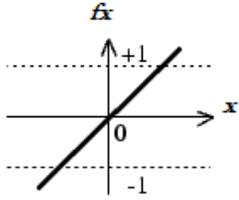
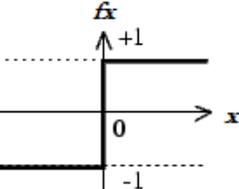
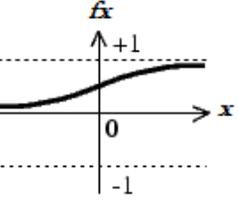
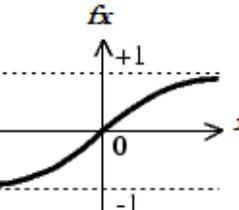
Donde $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son las señales de entrada; $w_{1j}, w_{2j}, w_{3j}, \dots, w_{nj}$ son los pesos sinápticos de la neurona j -ésima; u_j es la combinación lineal de las salidas debido a las señales de entrada; b_j es el sesgo; f es la función de activación y y_j es la señal de salida de la neurona.

Por lo anterior, la función de salida global de la neurona y_j depende de la función de activación empleada, ya que la función de activación define la salida en términos del campo local inducido.

Tipos de función de activación.

La función de activación (f) proporciona el estado de activación actual de una neurona j , en función de sus pesos, entradas y su potencial postsináptico actual, en el Cuadro 13, se ilustran algunas de ellas (Hagan, 1996).

Cuadro 13. Funciones de Transferencia

Funciones de Transferencia	Función	Rango	Gráfica
Identidad (linear) 	$f = x$	$[-\infty, +\infty]$	
Escalón (Symmetrical Hard Limit) 	$f = \text{signo}(x)$	$\{-1, +1\}$	
Sigmoidea (log Sigmoid) 	$f = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$[0, +1]$	
Sigmoidea Tangente Hiperbólica (Hyperbolic Tangent Sigmoid) 	$f = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	$[-1, +1]$	

Fuente: Libro de Neural network design y Redes Neuronales y sistemas Borrosos.

Aprendizaje

El aprendizaje de la red se define como el proceso en el cual se ajustan los parámetros, entre los que se destacan los pesos y los sesgos. Este proceso de ajuste se realiza con el objetivo de minimizar la diferencia entre la variable real y

la simulada con la red. Los cuatro tipos de aprendizajes más empleados son: el supervisado, el no supervisado o autoorganizativo, el híbrido y finalmente, el aprendizaje reforzado (Martín del Brío y Sanz 2007).

Las redes neuronales artificiales son métodos auto adaptativos basados en información o datos en las cuales hay pocas teorías a priori de modelos que describen un problema bajo estudio.

Las RNA aprenden de ejemplos y capturan las relaciones sutiles entre la información utilizada, incluso si las relaciones subyacentes son muy desconocidas o difíciles de describir, de esta forma las Redes Neuronales Artificiales son adecuadas para problemas cuyas soluciones requieren de conocimiento que es difícil de especificar, pero del cual hay bastantes datos u observaciones que lo describen (Zhang, et al. 1998)

Redes Neuronales Artificiales y sus aplicaciones

Las redes neuronales artificiales representan una tecnología y se han encontrado en áreas tan diversas como la neurofisiología, física, ingeniería biomédica, ingeniería electrónica, ciencias de la computación, acústica, cibernética, robótica, procesamiento de imágenes, finanzas y otras (Haykin, 1994; Govindaraju, 2000).

El enfoque de la red neuronal artificial juega un papel importante en construir modelos cuantitativos y es uno de los métodos más usados para predecir variables y es importante para la toma de decisiones, particularmente en los últimos años, como un método con alto nivel de validación en el campo de la economía y las predicciones financieras (Yildirim, et al., 2011; Veselý, 2011).

Las redes neuronales son diferentes de los ordenadores convencionales que usan algoritmos secuenciales, mientras que las redes neuronales artificiales actúan como el cerebro humano, procesando la información en paralelo, también pueden aprender y generalizar a situaciones no incluidas en el proceso de entrenamiento. Las redes neuronales pueden procesar información de forma

más rápida que los ordenadores convencionales, pero tienen la desventaja de que no se puede seguir su respuesta paso a paso como se puede hacer al ejecutar un programa convencional en un ordenador por lo que no resulta fácil detectar los errores (Duque, et al., 2006).

Matemáticamente, una Red Neuronal Artificial (RNA) es a menudo vista como un aproximador universal y son superiores a las técnicas de manipulación numérica, además, no es necesario suponer o identificar ninguna distribución de los datos. La capacidad de identificar una relación de patrones dados hace posible que las RNA resuelvan problemas complejos a gran escala, tales como el reconocimiento de patrones, modelos no lineales, clasificación asociación y control (Govindaraju, 2000; Bahrammirzaee, 2010).

El conocimiento de la experiencia es logrado normalmente por el entrenamiento de redes, usando pares de ejemplo de entradas y salidas para determinar los pesos sinápticos. El proceso de entrenamiento determina estos pesos minimizando algunos criterios de error, los cuales están relacionados con el cuadrado de las desviaciones entre el valor real y el valor predicho (Adeloye y Munari, 2006).

Las redes neuronales artificiales son metodologías utilizadas en numerosas series de tiempo para realizar predicciones, por ejemplo: Pino y Parreño (2005) emplearon redes neuronales para determinar el precio de la energía en España. Yildirim et al. (2011) utilizaron redes neuronales para determinar el rendimiento mensual en el sector de papel en Estambul. De igual forma, Hu *et al* (2012) aplicaron redes neuronales para predecir el precio en los futuros del petróleo. Sundermeyer *et al* (2013) utilizaron redes neuronales para el reconocimiento de voz francesa. Recientemente, otros investigadores (Meena y Agrawal, 2015; Salim et al., 2015) aplicaron redes neuronales para determinar el nivel de la marea.

En el mercado del café, García, (2003) empleó redes neuronales artificiales para el análisis y predicción del precio externo del café colombianos, de igual

forma, Velásquez y Aldana (2007) utilizando redes neuronales y otros modelos de predicción para modelar el precio del café colombiano en la bolsa de New York; afirmando que los resultados no fueron satisfactorios desde el punto de vista de la modelación.

2.4.2 Modelo Autorregresivo Integrado de promedios móviles (ARIMA)

Breve reseña histórica

Los modelos ARIMA son técnicas de modelado lineal, en la cual, se debe verificar la estacionaridad de la serie de tiempo. Si la serie de tiempo no es estacionaria, se deben realizar las diferencias que sean necesarias para volver la serie estacionaria. Los datos resultantes, son modelados como un proceso autorregresivo de promedios móviles (ARMA). El modelo ARMA más sencillo de explicar, es el siguiente: si y_t sigue un proceso ARMA (1,1) se puede escribir así:

$$y_t = \alpha + \beta_1 y_{t-1} + \gamma_0 \mu_t + \gamma_1 \mu_{t-1} \quad (3)$$

La ecuación anterior quiere decir que y_t está en función de una constante (α) más un coeficiente autorregresivo (β_1) de su valor pasado ($t - 1$), más un promedio móvil de los términos de error presente y pasado. El modelo ARMA asume que la secuencia de errores μ_t tiene ruido blanco y sigue la distribución gaussiana, por lo tanto, la varianza de estos errores es también un parámetro del modelo (Babu y Reddy, 2014)

El uso del tiempo t como una observación disponible en una serie de tiempo para predecir el valor futuro de ésta en el tiempo $t+1$ puede proporcionar las bases para: a) La planeación económica o de negocios, b) planeación de la producción, c) inventario y control de la producción y d) el control y optimización de los procesos industriales. El objetivo de obtener una función de predicción es que el cuadrado medio del error y la desviación entre el valor observado y el predicho sean lo más pequeño posible en cada instante de tiempo (Box y Jenkins, 1976, p 2).

Cuando G. P. E Box y G. M. Jenkins publicaron análisis de series de tiempo: pronóstico y control, se marcó el comienzo de una nueva herramienta de predicción en series de tiempo conocida como ARIMA, el cual no tiene interés en construir modelos uniecuacionales o de ecuación simultánea, sino en el análisis de propiedades probabilísticas de la serie de tiempo, este modelo es una sentencia algebraica que muestra como una variable de una serie de tiempo está relacionada con su propio pasado, siguiendo la filosofía de que los datos hablan por sí mismos (Guajarati, et al., 2010; Pankratz, 2009, p 16).

Un modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) o modelo Box-Jenkins, es un tipo de modelo que describe el comportamiento de la serie de tiempo y son particularmente exitosos y poderosos para realizar pronósticos, superando a los modelos de ecuaciones simultáneas en el desempeño de las predicciones y son adecuados para predicciones a corto plazo (Brandt ,2007; Pankratz, 2009, p 10).

El modelo matemático que se requiere emplear en un ARIMA contiene ciertas constantes o parámetros cuyos valores son estimados a partir de los datos, este modelo debe tener la menor cantidad de parámetros que den una adecuada representación, donde el principio de parsimonia juega un papel importante (Box y Jenkins, 1976, p 17).

Los modelos ARIMA son empleados en los pronósticos de series de tiempo, importantes en el análisis econométrico. “En general existen cinco enfoques de los pronósticos económicos basados en series de tiempo: 1) métodos de suavizamiento exponencial, 2) modelos de regresión uniecuacionales, 3) modelos de regresión de ecuaciones simultáneas, 4) modelos autorregresivos integrados de promedios móviles (ARIMA) y 5) modelos de vectores autorregresivos (VAR)” (Guajarati, *et al.*, 2010).

Un modelo ARIMA, es una combinación de diferentes modelos de operación que se integran en un método ampliamente usado en los estudios

econométricos y en diferentes tipos de análisis de datos de series de tiempo a corto y largo plazo (Ning et al., 2010).

Componentes del sistema ARIMA y ARIMAX

Los modelos ARIMA se componen de: la parte (AR) que significa autorregresiva, la parte (I) que significa diferenciar el modelo para que la serie de tiempo se vuelva estacionaria y la parte (MA) que se denomina de promedios móviles (Gujarati, et al., 2010, p777)

Proceso Autoregresivo: Como su nombre lo indica estos procesos son regresiones de una variable sobre sí misma. La ecuación general describe el orden p -ésimo del proceso autorregresivo en un tiempo t dado, por lo tanto, Y_t satisface la siguiente expresión (4) (Cryer y Kellet, 1991, p 66).

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t \quad (4)$$

El valor actual de la serie Y_t es una combinación lineal de los p valores pasados más recientes de sí mismo, más un término de innovación (e_t) que incorpora todo lo nuevo de la serie t que no es explicado por los valores pasado (Cryer y Kellet, 1991, p 66). Por ejemplo, un proceso autorregresivo de orden dos AR (2), quiere decir que el valor de la variable a predecir (Y) en el tiempo (t), depende de sus valores en dos periodos anteriores; Estos valores de (Y) son expresados alrededor del valor de la media δ (Gujarati, et al., 2010, p776) y se puede escribir mediante la siguiente expresión Ecuación (5)

$$(Y_t - \delta) = \phi_1 (Y_{t-1} - \delta) + \phi_2 (Y_{t-2} - \delta) + e_t \quad (5)$$

En otras palabras, los modelos AR se basan en la idea de que el valor actual de una serie Y_t puede ser explicado como una función de los valores de p , donde éste denota el número de pasos en el pasado necesarios para predecir un valor actual (Shumway y Stoffer, 2010, p 84).

El mismo autor comenta que, para los procesos AR existen medidas de dependencia como la función de autocorrelación (ACF), que mide la relación estadística entre las observaciones de la serie de tiempo, por ejemplo, se puede predecir el momento Y_t perfectamente en el momento Y_{t-1} a través de la siguiente relación lineal

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 Y_{t-1} \quad (6)$$

Luego la correlación en la ecuación 6 será +1 cuando $\beta_1 > 0$, y -1 cuando $\beta_1 < 0$, por lo tanto, se tiene una medida aproximada de la habilidad para predecir la serie de tiempo en el tiempo t desde el valor en $t - 1$.

A menudo la escala natural de los datos que representan una serie de tiempo no se encuentra en la escala apropiada para realizar un análisis de los mismos, por lo tanto, el objetivo de la transformación es identificar la escala donde los residuos después de ajustar un modelo, tendrán variabilidad homogénea y son independientes del nivel de la serie de tiempo (Bisgaard y Kulahci, 2011; p 70).

Un gran número de series de tiempo son estacionarias, y dice que una serie de tiempo es estrictamente estacionaria si sus propiedades no son afectadas cuando el tiempo transcurre, es decir, si la distribución de probabilidad conjunta de las observaciones $Y_t, Y_{t+1}, \dots, Y_{t+n}$ es estrictamente la misma distribución de probabilidad conjunta de las observaciones de $Y_{t+k}, Y_{t+k+1}, \dots, Y_{t+k+n}$, luego la serie de tiempo es estrictamente estacionaria (Montgomery, et al., 2011; p 25-26). En los modelos ARIMA esta transformación la hace el proceso Integrado (I).

Proceso Integrado (I): La parte (I) del modelo significa las diferencias que hay que realizarle a la serie de tiempo para que se vuelva estacionaria, en otras palabras, una serie de tiempo es integrada de orden I(d), si después de diferenciarla d veces se obtiene una serie I(0) o estacionaria. Los procesos estacionarios hacen parte de los procesos estocásticos, en los cuales se asume que el proceso está en un particular estado de equilibrio estadístico, por lo

anterior cuando una serie de tiempo es estacionaria la esperanza matemática, la varianza y la función de autocorrelación son constantes en el tiempo. La razón de realizar este proceso es identificar y estimar un modelo estadístico que se interprete como generador de datos muestrales (Box y Jenkins, 1976, p 26; Pankratz, 2009, p 11).

Es importante enfatizar que en una serie de tiempo es virtualmente imposible determinar si la serie es estacionaria o no, a partir simplemente de los datos, para ello se debe utilizar herramientas que determinan si la serie es estacionaria; una de ellas es la función de autocorrelación. Por ejemplo, si grafica la función de autocorrelación (ACF), si esta no decrece rápidamente, la serie no es estacionaria. Cuando esto sucede, se procede a realizar la primera diferenciación y se grafica nuevamente la ACF, rara vez hay que ir más allá de la segunda diferenciación (Bisgaard y Kulahci, 2011; p 80-81).

Finalmente, en el Proceso de promedios móviles: del modelo ARIMA, (MA) se emplea cuando el proceso AR no es el único que influye en la variable que se quiere predecir (Y), ya que esta variable también puede ser explicada a través de una constante que es el término de error estocástico de ruido blanco, así como, de los error presentes y pasados. Por ejemplo, si la variable a predecir (Y) sigue un proceso de promedios móviles de orden 2 quiere decir que esta variable depende de los promedios móviles en términos de error del presente y los periodos 1 y 2, más una constante, lo anterior, se puede expresar de la siguiente forma (Gujarati, *et al.*, 2010, p776).

$$Y_t = \mu + \beta_0 u_t + \beta_1 u_{t-1} + \beta_2 u_{t-2} \quad (7)$$

En general, para la construcción de un modelo ARIMA hay algunos pasos básicos, algunos de ellos son: a) Graficar y analizarla la serie de tiempo, para determinar tendencia y variabilidad; b) transformación de la base de datos, la cual debe hacerse cuando la variabilidad de los datos es creciente; c) Identificación preliminar de los valores del orden autorregresivos AR(p), de diferenciación I(d), y de promedios móviles MA(q); d) Estimación de parámetros;

e) diagnóstico y selección del modelo, f) finalmente la predicción con el modelo seleccionados. Los anteriores, son los pasos iterativos que hacen parte de la metodología de Box-Jenkins (Kohzadi, 1996; Shumway y Stoffer, 2010, p 145).

Lo más importante de los modelos ARIMA, es que la variable exógena del modelo a construir, son los valores pasados de la misma variable de estudio, lo cual ha causado críticas para el análisis de las series de tiempo, ya que no toman en cuenta otras variables explicativas que están relacionadas con el fenómeno a explicar (Hossain et al., 2006).

Para la implementación de los modelos ARIMAX, se deben emplear variables exógenas que estén relacionadas con la variable a explicar y seguir la misma metodología mencionada anteriormente con todas las variables.

Aplicaciones de los modelos ARIMA y ARIMAX

Los modelos ARIMA son ampliamente utilizados en el mundo para el análisis y predicción de series de tiempo en economía, por ejemplo: en economía, Hossain et al, (2006) usaron modelos ARIMA para determinar los precios mensual históricos, ex-post y ex ante de tres productos en Bangladés. Asimismo, Doshit *et al*, (2010) aplicaron modelos ARIMA para determinar el precio mensual de la harina en la India. En la industria, Ramos et al. (2014) emplearon un modelo de espacio de estados y un modelo ARIMA para determinar el precio al por menor de 5 diferentes tipos de calzado femenino.

Kumar y Jain (2010) utilizaron los modelos ARIMA para determinar 4 contaminantes del aire en India. Valipour et al. (2013) aplicaron modelos ARIMA para comparar su poder predictor y formar un modelo híbrido con redes neuronales para predecir la entrada de agua a una presa. Actualmente, Pannakkong *et al* (2016) emplearon modelos ARIMA y Redes Neuronales para predecir las exportaciones de almidón de yuca en Tailandia debido a su importancia económica.

Los modelos ARIMAX se han empleado últimamente en muchas disciplinas por su mejor desempeño en las predicciones en comparación con los modelos ARIMA, por ejemplo, Pektaş y Cigizoglu, (2013) emplearon modelos ARIMA, ARIMAX, redes neuronales y modelos Híbridos para determinar el coeficiente de escorrentía mensual de siete cuencas hidrográficas en Turquía. De igual forma De Felice *et al.*, (2013) usaron modelos ARIMA y ARIMAX para predecir la demanda de energía en Italia en la temporada de verano.

Por otra parte, Kordon, (2014) empleó modelos ARIMAX y programación genética para pronosticar el precio mensual de las materias primas y formar un modelo híbrido que mejore las predicciones. Recientemente, Maggina, (2015) empleó modelos contables de investigación y modelos ARIMAX para explicar los rendimientos de las acciones en el mercado de Grecia.

2.4.3 Parámetros estadísticos de desempeño

Una vez seleccionado el modelo se debe considerar como evaluar su desempeño para determinar que tan bien el modelo representa las respuestas del sistema o se ajusta a una base de datos, en este caso la serie de tiempo. Hay muchas medidas estadísticas que describen que tan bien es ajustado el modelo a una muestra de datos, y cuando más de una técnica de predicción es utilizada para una aplicación particular, las medidas de desempeño pueden también ser usadas para discriminar entre los modelos usados (Montgomery, et al., 2011; p 49).

La evaluación es importante para el uso potencial del modelo, ya que, el usuario necesita información acerca de la calidad del modelo para decidir qué tanta credibilidad debe darle al modelo. La evaluación es una de las principales actividades en todo trabajo de modelación, pero particularmente para modelos en agronomía (Wallach, et al., 2013; p 346).

Montgomery et al., (2011) mencionan que es habitual para evaluar el desempeño del modelo de predicción utilizar los errores hacia adelante, lo cual se puede ilustrar de la siguiente forma un paso hacia adelante:

$$e_t(1) = Y_t - \hat{Y}_{t-1} \quad (8)$$

Dónde: \hat{Y}_{t-1} es la predicción de Y_t que fue hecha un tiempo anterior, pero cuando los errores de pronóstico son hechos para n periodos de rezagos, deben utilizarse otros estadísticos.

El coeficiente de determinación (R^2) es otro criterio estadístico, en el cual el denominador es simplemente la suma total al cuadrado de las observaciones con respecto a la esperanza matemática, por lo tanto, es constante y no depende del modelo. El numerador es la suma de los residuales al cuadrado, por ende, seleccionar el modelo que maximiza el R^2 , es equivalente a seleccionar el modelo que minimiza la suma al cuadrado de los residuales, así, un valor alto del R^2 , sugiere un buen ajuste de los datos históricos (Ecuación 9); pero un valor alto del R^2 , no asegura que los errores de predicción hacia adelante fuera de la muestra serán pequeños (Montgomery *et. al.*, 2011).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (9)$$

Wallach et al., (2013), afirman que las figuras son ayudas visuales invaluable en la evaluación del modelo, pero se requiere un resumen cuantitativo de la bondad de ajuste de los datos, podría decirse que el error cuadrático medio (MSE) es una de las medidas más usadas (Ecuación 10).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (10)$$

Dónde: Y_i es el valor medido, \hat{Y}_i es el correspondiente valor simulado, y n es número de mediciones. El MSE mide la variabilidad (Varianza) en los errores de predicción, lo deseables es obtener la menor variabilidad en los errores de predicción (Montgomery, et al., 2011; p 50; Wallach, et al., 2013; p 356).

El MSE es la media al cuadrado de la diferencia entre el valor observado y el valor simulado o predicho, esta medida es similar a la del error absoluto medio (MAE), excepto que la función de cuadratura es utilizada en lugar de la función del valor absoluto. Como el MSE es calculada con los errores al cuadrado de la predicción, será más sensible a grandes errores y valores atípicos en comparación con el MAE. (Wilks, D. S. ,2011; p 326).

Una medida alternativa para determinar el error del modelo, que al igual que el MSE evitan la compensación entre la sub o sobre predicción, es el Error absoluto medio (MAE) (Ecuación 11). La unidad del MAE es la misma que la de 'Y' o variable a predecir, por lo tanto, no hay problema de sobre ponderación de grandes diferencias empleando MAE (Wallach, et al., 2013; p 356).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \widehat{Y}_i|$$

(11)

El MAE es una medida aritmética de valores absolutos de la diferencia entre los valores observados y predichos. Claramente el MAE es cero si las predicciones son perfectas o puede incrementar si las diferencias entre los valores predichos y observados son grandes, por lo tanto, MAE es una magnitud típica para los errores de predicción en un conjunto de datos de verificación (Wilks, D. S. ,2011; p 325).

Otro parámetro estadístico importante en la discriminación de modelos es el porcentaje del error absoluto medio, el cual indica cual fue el porcentaje del error cometido con el modelo en un tiempo dado (Ecuación 12) (Pektaş y Cigizoglu, (2013); Pao *et al.*, 2015).

$$MAPE = 100 * \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \widehat{Y}_i|}{Y_i}$$

(12)

Para modelos de agronomía la esperanza matemática de los valores observados es el predictor con menos peso (credibilidad), el predictor más

utilizado y con mayor credibilidad probablemente es el que determina la eficiencia del modelo definido como (Wallach et al., 2013):

$$EF = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (13)$$

El mismo autor menciona que, si el modelo es perfecto los valores predichos será igual a los valores observados o medidos ($Y_i = \hat{Y}_i$), por lo tanto, la eficiencia del modelo será $EF = 1$. Por el contrario, un modelo con $EF = 0$ significa que el predictor no es mejor que la esperanza matemática ($\bar{Y} = \hat{Y}$), por ende, no será un buen modelo, además si $EF < 0$, quiere decir que el predictor es peor estimador que la esperanza matemática.

LITERATURA CITADA

- Adeloye, A. J., & De Munari, A. (2006). Artificial neural network based generalized storage–yield–reliability models using the Levenberg–Marquardt algorithm. *Journal of Hydrology*, 326(1), 215-230.
- Alvarado, G., Posada, H. E., & Cortina, H. A. (2005). Castillo: nueva variedad de café con resistencia a la roya. *Avance técnico* 337 CENICAFE.
- AMECAFE. Asociación Mexicana de la cadena productiva del café S. A. (2013). Exportaciones mensuales. “Julio 2013”. [Fecha de consulta: 11 agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.amecafe.org.mx/downloads/exportaciones/Exportaciones%20Mensuales%20Julio%202013.pdf>
- Arcila, P. J., Farfán, V. F., Moreno, B. A., Salazar, G. L. F., Hincapié, G. E. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. Chinchiná-Colombia. FEDECAFE. 309p.
- Banco Mundial (2016). Población total. [Fecha de consulta: 22 enero de 2016]. Disponible en: <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL/countries?display=default>
- Babu, C. N., & Reddy, B. E. (2014). A moving-average filter based hybrid ARIMA–ANN model for forecasting time series data. *Applied Soft Computing*, 23, 27-38.
- Bahrammirzaee, A. (2010). A comparative survey of artificial intelligence applications in finance: artificial neural networks, expert system and hybrid intelligent systems. *Neural Computing and Applications*, 19(8), 1165-1195.

- Braudel, F., & Gemelli, G. (1981). La dinámica del capitalismo. Fondo de la cultura económica, Il mulino.
- Brandt, P. T. (2007). Multiple time series models (No. 148). Sage Publications. 99p.
- Benetti, C. (1978). Valor y distribución. Editorial Saltés. Madrid España. 236p.
- Berne Declaration. (2011). Commodities, switzerland's most dangerous business. Agricultural trade. Zurich. 232-245 pp. Disponible en: http://www.evb.ch/cm_data/2011_09_19_Berne_Declaration_-_Commodities_-_English_Sample.pdf. [Consultado en: 6 de noviembre, 2013]
- Bisgaard, S., & Kulahci, M. (2011). Time series analysis and forecasting by example. John Wiley & Sons. 366 p.
- Box, G. E. (1976). P, and Jenkins, GM., "Time Series Analysis: Forecasting and Control,". Time Series and Digital Processing. 575p
- Cachanosky, J. C. (1994). Historia de las teorías del valor y del precio. Parte I. Revista Libertas, 20(1994), 100p.
- Cachanosky, J. C. (1995). Historia de las teorías del valor y del precio. Parte II. Revista Libertas, 22(1995). 42p.
- Café Colombiano (2015). Información sobre el café de Colombia. Indicador diario de precios del café. [Fecha de consulta: 09 de mayo de 2015] Disponible en: <http://xn--cafcolombiano-dhb.com/indicador-diario-de-precios-del-cafe/>
- Cano, Saenz. G. C., Vallejo, C. M., Caicedo, E. G., Amador, J. S. T., & Tique, E. Y. C. (2012). El mercado mundial del café y su impacto en Colombia (No. 009612). BANCO DE LA REPÚBLICA.
- Castaño, S. H., Muñoz, G. R., Morales D. E., García R. M., Ramos, S. N., González, G. A., Sánchez, M, R. I., Figueroa A. V., (2004). Economía política marxista reflexiones para un debate. Editorial Feliz Varela, la habana, 223p.
- CONAB (2014). Compañía Nacional de Abastecimiento. Levantamiento de Safra. [Fecha de consulta: 21 de octubre de 2014] Disponible en:

http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_01_17_09_29_46_boletim_cafe_-_original_normalizado.pdf

- Chu, Y. F. (Ed.). (2012). Coffee: emerging health effects and disease prevention (Vol. 59). John Wiley & Sons. 324 p.
- Clarke, R. J., Macrae, R. (2012). Coffee: Volume 1: Chemistry. Springer Science & Business Media. 306 p.
- Cryer, J. D., & Kellet, N. (1991). Time series analysis. Royal Victorian Institute for the Blind. Tertiary Resource Service. 486 p.
- De Felice, M., Alessandri, A., & Ruti, P. M. (2013). Electricity demand forecasting over Italy: Potential benefits using numerical weather prediction models. *Electric Power Systems Research*, 104, 71-79.
- Doshit, Y., Adabar, K., & Achuthan, S. (2010). ARIMA MODEL FOR FORECASTING OF WHEAT PRICES IN INDIA. *GSTF Business Review (GBR)*, 1(2), 246.
- Duque, F. V., Trejos, W. M., & Henao, M. A. (2006). Pronóstico de las tasas de cambio. Una aplicación al Yen Japonés mediante redes neuronales artificiales. *Scientia et Technica*, 1(30).
- FAO (2014). Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. El estado de los mercados de los productos básicos agrícolas. FAOSTAT. [Fecha de consulta: 30 de agosto de 2014] Disponible en: <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/S>
- Farah, A., & dos Santos, T. F. (2014). The Coffee Plant and Beans: An Introduction.
- FEDECAFE (2014a). Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Historia del café. Especies Comerciales y su origen. [Fecha de consulta: 07 de octubre de 2014] Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/el_cafe/
- FEDECAFE (2014b). Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Estadísticas Históricas. Exportaciones colombianas de café. [Fecha de

consulta: 29 de agosto de 2014] Disponible en:
http://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/quienes_somos/119_estadisticas_historicas/

- Figueroa H. E.; Pérez S. F.; Portillo V. M.; Valdivia A. R. (2007). Evolución del mercado mexicano del café. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco Estado de México. 414 p. ISSN 978-968-02-0413-7.
- Fitter, R. (2001). Who Gains from Product Rents as the Coffee Market Becomes More Differentiated? A Value-chain Analysis. *IDS Bulletin*, 32(3), 69-82.
- Fridell, G. (2014). *Coffee*. John Wiley & Sons Cambridge, United Kingdom.
- García, M I. (2003). Análisis Y Predicción De La Serie De Tiempo Del Precio Externo Del Café Colombiano Utilizando Redes Neuronales Artificiales. *Universitas Scientiarum*, 8, 45-50.
- Govindaraju, R. S. (2000). Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 115-123.
- Gujarati, D., & Porter, D. (2010). *Econometría (quinta Edición)*. México: Editorial Mc. Graw Hill. 921p.
- Hagan, M. T., Demuth, H. B., & Beale, M. H. (1996). *Neural network design*. Boston: Pws Pub. 19-21 p
- Haykin, S. (1994). *Neural networks: a comprehensive foundation*. Prentice Hall PTR. 842 p.
- Hollander, S. (1988). *La economía de David Ricardo*. Primera edición en español 1988. Fondo de Cultura Económica. México D. F. 677 p.
- Hossain, Z., Abdus Samad, Q., & Ali, Z. (2006). ARIMA model and forecasting with three types of pulse prices in Bangladesh: a case study. *International Journal of Social Economics*, 33(4), 344-353.
- Hu, J. W. S., Hu, Y. C., & Lin, R. R. W. (2012). Applying neural networks to prices prediction of crude oil futures. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012.
- ICO (2013). International Coffee Organization. Botanical Aspects. Disponible en: <http://www.ico.org/botanical.asp> [consultado: 26 de marzo, 2013]

- ICO (2015a). Statistics International Coffee Organization. Histotical Data on the Global Coffee Trade [Fecha de consulta: 18 de diciembre de 2015]. Disponible en: http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics
- ICO (2015b). International Coffee Organization. About us, history. [Fecha de consulta: 01 de octubre de 2014]. Disponible en: http://www.ico.org/ES/coffee_storyc.asp.
- ICO (2015c). International Coffee Organization 2013. Histotical Data on the Global Coffee Trade. [Fecha de consulta: 08 de marzo de 2015] Disponible en: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>
- ICO (2015d). International Coffee Organization. About us, Mission. [Fecha de consulta: 18 de diciembre de 2015]. Disponible en: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Ls_pXdOhjZ0J:www.ico.org/es/missionc.asp%3Fsection%3DQui+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co
- ICO (2016a). International Coffee Organization. Forma de Gobernar [Fecha de consulta: 22 enero de 2016]. Disponible en: http://www.ico.org/es/members_c.asp
- ICO (2016b). International Coffee Organization. Titulares de cargo para el año cafetero 2015/2016 [Fecha de consulta: 22 enero de 2016]. Disponible en: http://www.ico.org/es/office_holders_c.asp
- ICO (2016c). International Coffee Organization. Mision. [Fecha de consulta: 22 enero de 2016]. Disponible en: <http://www.ico.org/es/missionc.asp?section=Qui>
- ICO (2016d). International Coffee Organization. Importing countries. [Fecha de consulta: 22 de enero de 2016]. Disponible en: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/2b-imports.pdf>
- ICO (2016e). International Coffee Organization. Datos estadísticos. [Fecha de consulta: 22 de enero de 2016]. Disponible en: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/3c-indicator-prices.pdf>

- ICO (2016f). International Coffee Organization. Datos estadísticos. Reexportaciones. [Fecha de consulta: 22 de enero de 2016]. Disponible en: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>
- ICO (2016g). International Coffee Organization. Datos estadísticos. [Fecha de consulta: 22 de enero de 2016]. Disponible en: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/2c-re-exports.pdf>
- INMET (2015). Instituto Nacional de meteorología. Datos Históricos. Banco de datos históricos para enseñanza y meteorología. [Fecha de consulta: 09 de mayo de 2015]. Disponible en: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>
- James, E. (1974). Historia del Pensamiento Económico en el siglo XX. Fondo de la Cultura económica. México. 586p.
- Kautsky, K. (1968). La cuestión agraria: análisis de las tendencias de la agricultura moderna y de la política agraria de la socialdemocracia. Sexta edición, 1984. Siglo XXI editores. 540 p.
- Keynes, J. M. (1936). Teoría general de la ocupación, el interés y el dinero. Fondo de la cultura económica. México 2003. Tercera reimpresión 2012. Traducción de Eduardo Hornedo. 283 pp.
- Kohzadi, N., M. S. Boyd, B. Kermanshahi, and I. Kaastra. 1996. A comparison of artificial neural network and time series models for forecasting commodity prices.
- Kordon, A. K. (2014). Applying Genetic Programming in Business Forecasting. In Genetic Programming Theory and Practice XI (pp. 101-117). Springer New York.
- Kowalik, W., Dabrowska-Zielinska, K., Meroni, M., Raczka, T. U., & de Wit, A. (2014). Yield estimation using SPOT-VEGETATION products: A case study of wheat in European countries. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 32, 228-239.
- Kuit, M., Jansen, D. M., & Nguyen, V. T. (2004). Manual for Arabica cultivation. Tan Lam Agricultural Product Joint Stock Company, Quang Tri.

- Kumar, U., and V. K. Jain. 2010. ARIMA forecasting of ambient air pollutants (O₃, NO, NO₂ and CO). *Stoch. Environ. Res. and Risk Assessment*. 24(5), 751-760.
- Leavitt, L. (2009) International Coffee Organization (www.ico.org), *Journal of Business & Finance Librarianship*, 14:2, 176-180
- Love, R. (1999). Coffee crunch. *Review of African Political Economy*. Published online: 24 Feb 2007. 26:82, 503-508
- Maggina, A. (2015). Market-Based Accounting Research (MBAR) Models: A Test of ARIMAX Modeling. In *Handbook of Financial Econometrics and Statistics* (pp. 279-298). Springer New York.
- Martín del Brío, B.; Sanz, M. A. (2007). *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*. Alfaomega grupo editor. Tercera edición. México. 404 p.
- Marshall, A. (1978). *Obras escogidas*. Primera reimpresión. Fondo de la cultura económica. México. 294p.
- Marx, K. (1867). *El capital*. Crítica de la economía política. Decimocuarta reimpresión 1979. Tomo I. México: traducción de Wenceslao Roces. Fondo de cultura económica. 769p.
- Meena, B. L., and J. D. Agrawal. 2015. Tidal Level Forecasting Using ANN. *Procedia Eng*. 116: 607-614.
- Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Kulahci, M. (2011). *Introduction to time series analysis and forecasting* (Vol. 526). John Wiley & Sons. 441 p.
- Mohan, S. (2007). Market-based Price-risk Management for Coffee Producers. *Development Policy Review*, 25(3), 333-354.
- Ning, W., Kuan-jiang, B., & Zhi-fa, Y. (2010). Analysis and forecast of Shaanxi GDP based on the ARIMA Model. *Asian Agricultural Research*, 2(01).
- Norton, R. D. (2004). *Política de desarrollo agrícola: conceptos y principios*. FAO. 591p.
- Olden, J. D., & Jackson, D. A. (2002). Illuminating the “black box”: a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks. *Ecological modelling*, 154(1), 135-150.

- Pankratz, A. (2009). Forecasting with univariate Box-Jenkins models: Concepts and cases (Vol. 224). John Wiley & Sons. 562p
- Pannakkong, W., Huynh, V. N., & Sriboonchitta, S. (2016). ARIMA Versus Artificial Neural Network for Thailand's Cassava Starch Export Forecasting. In *Causal Inference in Econometrics* (pp. 255-277). Springer International Publishing.
- Pao, H. T., Chen, H. A., & Li, Y. Y. (2015). Competitive dynamics of energy, environment, and economy in the US. *Energy*, 89, 449-460.
- Pektaş, A. O., & Cigizoglu, H. K. (2013). ANN hybrid model versus ARIMA and ARIMAX models of runoff coefficient. *Journal of hydrology*, 500, 21-36.
- Pelupessy, W. (2001). La crisis de mercado en cadenas globales del café. *Perspectivas Rurales Nueva Época*, (9).
- Pelupessy, W. (2007). The World behind the World Coffee Market. *Études rurales*, 189-211.
- Pino, D. R., & Parreño, F. J. (2005). Forecasting the Price of Energy in Spain's Electricity Production Market. In *IX Congreso de Ingeniería de Organización* (p. 232).
- Ponte, S. (2001). Behind the coffee crisis. *Economic and Political Weekly*, 4410-4417.
- Ponte, S. (2002). The 'latte revolution'? Regulation, markets and consumption in the global coffee chain. *World Development*, 30(7), 1099-1122.
- Ramírez, V., Arcila, J., Jaramillo, A., Rendon, J., Cuesta, G., Garcia, C. J., & BAUTE, J. (2011). Variabilidad climática y la floración del café en Colombia. *Avance técnico. CENICAFE*.
- Ramos, P., N. Santos, and R. Rebelo. 2015. Performance of state space and ARIMA models for consumer retail sales forecasting. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 34: 151-163.
- Ricardo, D. (1959). *Principios de economía política y tributación*, Quinta reimpresión 1994. México. Fondo de la cultura económica. 330p.
- Rivera, M. D. R. S., Gavrilov, I. N., Castrillón, M. A., Ordaz, V. M. C., Díaz, G. P., & Guajardo, R. A. P. (2013). VULNERABILIDAD DE LA

PRODUCCIÓN DEL CAFÉ (*Coffea arabica* L.) AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL. Terra Latinoamericana, 31, 305-313.

- Rosenberg, D. I. (1979). Comentarios a los tres tomos de El Capital. Editorial de Ciencias Sociales 751p.
- Rumiántsev, A. (1980). Economía política, CAPITALISMO, manual. Editorial progreso Moscú 1980, 798p.
- Sagarpa (2011). Plan de Innovación de la cafecultura de México. Proyecto estratégico fomento productivo 2010. Estrategias de Innovación hacia la competitividad de la cafecultura. México DF. noviembre 2011. Disponible en: <http://amecafe.org.mx/downloads/PLAN%20DE%20INNOVACION%20NACIONAL.pdf>
- Salim, A. M., G. S. Dwarakish, K. V. Liju, J. Thomas, G. Devi, and R. Rajeesh. 2015. Weekly Prediction of Tides Using Neural Networks. Procedia Eng. 116: 678-682.
- Smith. A. (1937). Investigación sobre la naturaleza y causa de la riqueza de las naciones. Fondo de la cultura económica. Novena reimpresión 1997. México.
- Santoyo, V.; Díaz, S.; Rodríguez, B.; & Pérez, J. (1994). Sistema agroindustrial café en México: diagnóstico, problemática y alternativas. Universidad Autónoma Chapingo.
- Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2010). Time series analysis and its applications: with R examples. Springer Science & Business Media. 596 p.
- Sundermeyer, M., Oparin, I., Gauvain, J. L., Freiberg, B., Schluter, R., & Ney, H. (2013). Comparison of feedforward and recurrent neural network language models. In Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE International Conference on (pp. 8430-8434). IEEE.
- Talbot, J. M. (1997). Where does your coffee dollar go? The division of income and surplus along the coffee commodity chain. Studies in Comparative International Development, 32(1), 56-91.

- Tucker, C. M. (2011). *Coffee culture: Local experiences, global connections*. Routledge.
- Valipour, M., Banihabib, M. E., & Behbahani, S. M. R. (2013). Comparison of the ARMA, ARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez dam reservoir. *Journal of Hydrology*, 476, 433-441.
- Velásquez, H. J. D., & Aldana, D. M. A. (2007). Modelado del precio del café colombiano en la bolsa de Nueva York usando redes neuronales artificiales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 60(2), 4129-4144.
- Veselý, A. (2011). Economic classification and regression problems and neural networks. *Agricultural Economics (Zemědělská Ekonomika)*, 57(3), 150-157.
- Villers, L. V. R., Arizpe, N., Orellana, R., & Hernández, J. (2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 34(5), 322-329.
- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., & Brun, F. (2013). *Working with Dynamic Crop Models: Methods, Tools and Examples for Agriculture and Environment*. Academic Press. 487 p.
- Wellman, F. L. (1961). *World crops books. Coffee*. The university press Aberdeen, London. 431 p.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences (Vol. 100)*. Academic press. 676 p.
- Wintgens, J. N. (2009). *Coffee: growing, processing, sustainable production. A guidebook for growers, processors, traders and researchers*. Wiley-Vch.
- Yildirim, I., Ozsahin, S., & Akyuz, K. C. (2011). Prediction of the Financial Return of the Paper Sector with Artificial Neural Networks. *BioResources*, 6(4).
- Zhang, G., Eddy Patuwo, B., & Y Hu, M. (1998). Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. *International journal of forecasting*, 14(1), 35-62.

Zorrilla, A. S; Méndez, J. S. (2011). Diccionario de Economía. Editorial Limusa.
Tercera Edición. México. 322 p.

3. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp. Núm. 8 16 de mayo - 29 de junio, 2014 p. 1433-1439

3.1 OPTIMIZACIÓN DEL USO DE FERTILIZANTES PARA EL CULTIVO DE CAFÉ

OPTIMIZING THE USE OF FERTILIZERS FOR GROWING COFFEE

Bedoya C.M.*¹, Salazar M.R.²

¹Economía Agrícola-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, C. P. 56230, Texcoco, Estado de México. ²Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, C. P. 56230, Texcoco, Estado de México. (raquels60@hotmail.com). §Autor para Correspondencia: marlio.bedoya@gmail.com.

RESUMEN

La caída del precio del café en las diferentes bolsas de valores del mundo, hace que esta actividad sea cada vez menos rentable, por los elevados costos de producción. La mano de obra y la fertilización son los factores más importantes en la producción. Por lo anterior, con el presente estudio se busca minimizar los costos por el uso de fertilizantes por hectárea-año, utilizando programación lineal con diferentes fuentes nutricionales que se encuentran disponibles en el mercado del municipio de Gigante en el departamento del Huila en Colombia, teniendo en cuenta los requerimientos del cultivo propuestos por Sadeghian y González, (2012). Los resultados indican que al usar fuentes nutricionales simples se minimizan los costos de fertilización por hectárea-año en un 38.52% (US \$329.58) en comparación al empleo de Hydranova un fertilizante compuesto de uso común.

Palabras Claves: Macronutrientes, reducción de costos, Requerimientos nutricionales, Café.

ABSTRACT

The decrease in coffee prices in the exchange stock markets in the world, makes this activity less profitable due to its high production cost. Labor and fertilization are the most important production factors. Therefore, this study will be concentrated in minimizing the fertilization cost per hectare-year using a linear program with different nutritional sources. Data was gathered from the Gigante market town

in the department of Huila in Colombia. The crop requirements proposed by Sadeghian and González (2012) were used. The results indicate that the use of simple nutritional sources decrease production costs per hectare-year by 38.52% (US \$329.58) compared to the actual use of compound Hydranova, a fertilizer of common use.

Keywords: Macronutrients, cost reduction, nutritional requirements, Coffee.

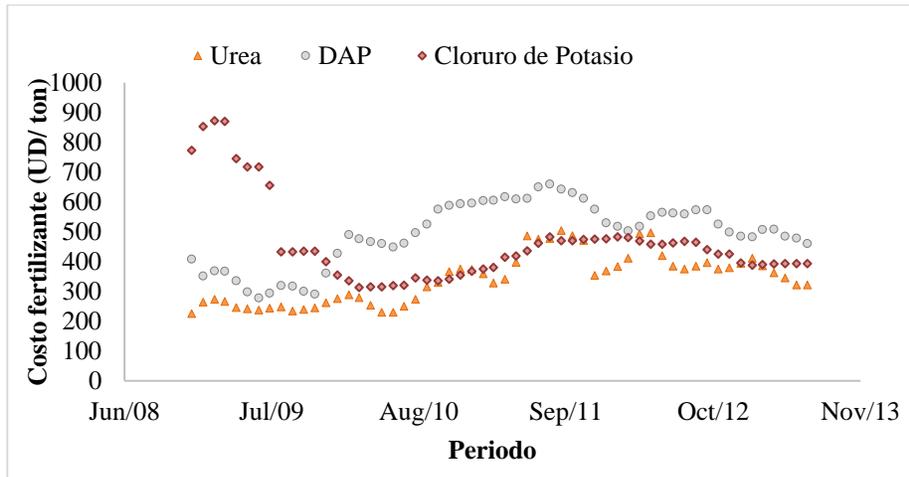
El café es uno de los productos de origen agrícola más importantes que se comercializan a nivel internacional, siendo los principales productores del grano tipo arábica y robusta: Brasil, Vietnam, Indonesia, Colombia, y Etiopía. Las variables que más influyen en la producción del café son densidad de siembra, edad del plantío, variedad, condiciones agroclimáticas y manejo agronómico, dentro de esta última se encuentra la fertilización. De acuerdo con Sadeghian y González (2012) la fertilización busca mantener o aumentar la materia orgánica, nutrientes en el suelo y la resistencia de las plantas a condiciones de estrés como la incidencia de plagas, enfermedades, y sequías.

Existen diversas investigaciones relacionadas con el efecto de los nutrientes en el cultivo del café, algunos autores mencionan que la demanda de nutrientes varía con la etapa de desarrollo del cultivo Echeverri (1994). Sin embargo, la dosis anual recomendada es de 1000 Kg de mezcla de fertilizantes simples para cafetales con rendimiento promedio por año de 5000 Kg ha⁻¹, sin considerar análisis de suelo (Valencia, 1992).

Ribeiro *et al.* (2003) en el estado de bahía en Brasil han utilizado dosis de nitrógeno entre 600 a 800 kg N ha⁻¹ año⁻¹. Por otro lado, Sadeghian y González (2012) en su investigación proponen las siguientes cantidades para un año: 300 Kg ha⁻¹ de nitrógeno (N), 260 Kg ha⁻¹ de potasio (K₂O) y 50 Kg ha⁻¹ de fósforo (P₂O₅), de magnesio (MgO) y azufre (S), para el cultivo del café tecnificado con alta densidad (7500 y 10000 plantas ha⁻¹) cuando no se cuenta con análisis de suelo.

La obtención de la máxima productividad con una reducción de los fertilizantes nitrogenados es un gran desafío (Bruno *et al.*, 2011). En la Figura 1 se observa el elevado costo de las principales fuentes

nutricionales utilizadas en el cultivo del café, por lo tanto, es de gran interés para los productores de este ramo el hacer más eficiente la aplicación de este insumo y al mismo tiempo mantener o incrementar la productividad.



Fuente: IndexMundi.

Figura 1. Costo mensual de los principales fertilizantes en Dólar americanos (US)

Sadeghian (2008), manifiesta que actualmente los productores de café se enfrentan a un mercado mundial cada vez más competitivo, se hace prioritario revisar los factores que afectan la rentabilidad del cultivo, entre los cuales se incluye el costo de los fertilizantes, cuyas continuas alzas han generado preocupación en Colombia, pues la participación de la fertilización en los costos totales de producción ha pasado del 10 al 20%, en los últimos dos años.

El objetivo de este trabajo es encontrar las dosis de fertilizante óptimas que minimicen el costo por este concepto en la producción de café, proporcionando una recomendación factible a los productores del municipio de Gigante en el departamento del Huila-Colombia.

Gigante se encuentra ubicado en el departamento del Huila a $2^{\circ} 23' 12.01''$ N y $75^{\circ} 32' 45.96''$ W. Según el anuario estadístico agropecuario del departamento del Huila 2012, el municipio de Gigante tenía un área sembrada en café de 5294 hectáreas, de las cuales 2396.9 se encuentran en renovación (zoca y siembra), y

2897.1 hectáreas se encuentran en etapa de producción. Estas últimas arrojaron una producción de 3166.8 toneladas de café pergamino seco para este mismo año.

Para abordar el problema de minimización de costos se utilizará la Programación Lineal dada su fortaleza para modelar problemas complejos (Alvarado, 2010), y la posibilidad que tienen los usuarios para resolver modelos de gran escala mediante programas de cómputo basados en el método simplex.

Algunos investigadores tales como Zambrano *et al.* (2005), utilizaron la programación lineal para formulación de mezclas de sustrato y comprobaron que su empleo permite reducir el número de mezclas por analizar hasta en un 93% en comparación con el método tradicionalmente empleado (ensayo y error).

El problema de minimización del costo por concepto de uso de fertilizantes, se plantea en la expresión (1)

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{20} x_i C_i \quad (1)$$

Sujeto a

$$Ax_i \geq B$$

$$x_i \geq 0$$

Donde:

Z = Representa el costo de fertilizantes que se desea minimizar

C_i = Coeficientes de costo de las 20 fuentes nutricionales empleadas (Cuadro 1).

x_i = Fuentes nutricionales (Cuadro 1)

A = Matriz de coeficientes técnicos. La cual representa los aportes nutricionales de Nitrógeno, Fosforo, Potasio, Calcio, Azufre y Magnesio de las 20 fuentes nutricionales.

B = Requerimientos nutricionales establecidos por Sadeghian y González (2012).

Los fertilizantes simples y compuestos utilizados en programación lineal, se encuentran disponibles en el Cuadro 1. Es importante mencionar que los precios de estas fuentes están en dólares americanos (US) y fueron consultados el 30 de abril del 2013 en la Cooperativa Central de Cafeticultores del Huila Ltda.

Cuadro 1. Fuentes de fertilizantes simples y compuestos.

Variables	Fuentes nutricionales	Concentraciones (%) (N-P-K-Ca-S-Mg) †	Costo dólares Bulto/ 50 Kg.
x1	Cargil ^c	25-4-24-0-0-0	33.7473
x2	Abotek ^c	15-4-23-0-2-4	38.3369
x3	Tripe 15 ^c	15-15-15-0-0-0	38.3369
x4	Agrocafe (nutrimon) ^c	17-6-18-0-2-2	37.527
x5	Tradición cafetera ^c	17-6-18-3-0-2.8	33.9093
x6	Agrimis ^c	8-5-0-18-1.6-6	37.527
x7	Agriplan cafetero ^c	21-5-18-2-0-0	35.9071
x8	Cafeaza ^c	20-4-18-4-0-0	42.1166
x9	Carge (fosfacol) ^c	17-8-12-9-2-2	36.987
x10	Cloruro de Potasio (KCl) ^s	0-0-60-0-0-0	30.2376
x11	CoNplexc	27-6-3-0-2-4	37.527
x12	Fosfato de Amonio ^c	18-45-0-0-0-0	35.6371
x13	Hydranova ^c	19-4-19-0-1.8-3	37.527
x14	Kafertil ^c	24-3-20-3-4-0	34.3952
x15	Remital ^c	17-6-18-0-1.6-2	37.257
x16	SAM (Sulfato de Amonio) ^s	21-0-0-0-24-0	21.0583
x17	Urea ^s	46-0-0-0-0-0	28.0778
x18	Producción (Nutrifer) ^c	24-3-20-3-4-0	34.4492
x19	Quimifos ^c	3-3-3-14-7-3	37.257
x20	Sulfato de Magnesio ^s	0-0-0-0-13-16	31.3175
Requerimientos (Kg/ha/año)		300-50-260-0-50-50	

C Fertilizantes Simples, S Fertilizantes Compuestos

† (N=Nitrógeno; P=Fosforo; K=Potasio; Ca=Calcio; S=Azufre; Mg=Magnesio)

El modelo de programación lineal planteado en (1) se resolvió utilizando el programa Lindo 6.1, los resultados obtenidos se sintetizan en el Cuadro 2, al multiplicar las cantidades de fertilizantes obtenidas (cuadro 2 columna 4), por el precio de cada fuente nutricional (cuadro 1, columna 4), se obtiene el costo/hectárea/año para la fertilización del cultivo de café de \$ 885.52 dólares americanos (US).

Cuadro 2. Cantidades de fuentes a utilizar en la fertilización del cultivo del café

Variables	Fuentes nutricionales	Cantidad a utilizar (kg)	Bultos (50 Kg)	Costo Reducido dólares (Kg).
x1	Cargil	0		0.0837
x2	Abotek	0		0.1601
x3	Tripe 15	0		0.2681
x4	Agrocafe (nutrimon)	0		0.2152
x5	Tradición cafetera	0		0.1291
x6	Agrimis	0		0.4741
x7	Agriplan cafetero	0		0.2251
x8	Cafeaza	0		0.3723
x9	Carge (fosfacol)	0		0.2428
x10	Cloruro de Potasio (KCl)	433.34	8.67	0
x11	CoNplex	0		0.1772
x12	Fosfato de Amonio	111.11	2.22	0
x13	Hydranova	0		0.1704
x14	Kafertil	0		0.1328
x15	Remital	0		0.212
x16	SAM (Sulfato de Amonio)	39.06	0.78	0
x17	Urea	590.87	11.82	0
x18	Producción	0		0.1338
x19	Quimifos	0		0.5296
x20	Sulfato de Magnesio	312.5	6.25	0

Las cantidades de fuentes nutricionales que minimizan los costos de fertilización en el cultivo de café son 8.67 bultos de cloruro de potasio, 2.22 bultos de fosfato de amonio, 0.78 de sulfato de amonio, 11.82 bultos de urea y 6.25 bultos de sulfato de magnesio (Cuadro 2, Columna 4).

En el Cuadro 3 se hace una comparación económica utilizando las fuentes y cantidades seleccionadas por el programa Lindo 6.1 (óptimas) con dos de los fertilizantes de uso común empleados en Colombia para fertilizar el cultivo del café.

Tomando como referencia una hectárea (1 Ha), un periodo de producción de 4 años (periodo productivo después de la primera cosecha), y suponiendo que el precio de las fuentes nutricionales en este periodo es

constante, se calculó el ahorro anual en US \$ 329.58 dólares, como la diferencia del costo de fertilización entre el Hydranova y las cantidades óptimas obtenidas (Cuadro 3)

Cuadro 3. Fuentes nutricionales de uso común para el cultivo de café

Fuentes nutricionales	Cantidad (kg/ha/año)	Costo de fertilización	Suministro de nutrientes (Kg)				
			(N) ¹	(P ₂ O ₅) ²	(K ₂ O) ³	(S) ⁴	(MgO) ⁵
Remital	1,765	1,315.17	300	106	318	28	35
Hydranova	1,579	1,185.10	300	63	300	28	47
Óptimas	1,487	855.52	300	50	260	50	50

1 Nitrógeno, 2 Fósforo, 3 Potasio, 4 Azufre, 5 Magnesio

Considerando el periodo de producción de café de cuatro años. El valor presente del flujo anual de ahorros se obtiene utilizando la ecuación (2) con un interés anual de 3.96% establecido por el Banco de la república de Colombia, el ahorro total es de 1,197.47 dólares.

$$VP = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (2)$$

Donde:

VP = Valor presente

A = Flujo anual de ahorros (329.58 dólares)

i = Interés anual (3.96%)

n = Número de Años (4)

$$VP = 329.58 * \left[\frac{(1.0396)^4 - 1}{0.0396 * (1.0396)^4} \right] \rightarrow VP = US \$ 1,197.47$$

Aunque en la actualidad existen herramientas de optimización mucho más sofisticadas, la programación lineal continúa siendo una técnica importante en la solución de problemas de optimización en la agricultura. El presente estudio estuvo enfocado al caso específico del municipio de Gigante, en Colombia, con 2897.1

hectáreas productivas de café. Los resultados mostraron una reducción de 38.52% en los costos de fertilización para el año 2013, en comparación con Hydranova un fertilizante compuesto de uso común por los cafetaleros de esta región en Colombia. Asimismo, aplicando las dosis recomendadas obtenidas en el modelo de programación lineal, los productores podrán obtener un ahorro por hectárea en 4 años de 1,197.47 dólares y considerando las hectáreas productivas de café en el municipio de Gigante, el beneficio económico para esta región es considerable.

LITERATURA CITADA

Alvarado, B. J. Análisis post-optimal en programación lineal aplicada a la agricultura. Rev. Reflexiones 90 (1): 161-173.

Bruno, I. P.; Murray J. U.; Bortolotto, R. P.; Osny O.S. Bacchic, O. S. O.; Dourado-Neto, D.; Reichardt, K. 2011. Fertilizer nitrogen in fertigated coffee crop: Absorption changes in plant compartments over time. Field Crops Research 124: 369–377.

Echeverría, L. M. J. 1994. Fertilización de los cafetales basada en el análisis de suelos, la mejor inversión. Avances técnicos Cenicafe Número 202. ISSN -0120-0178.

Ribeiro, M. M.; Díaz, N. F.; Gontijo, G. P.T. 2003. Chemical Composition, Yield And Quality Of The Fertilized Coffee With Different Sources And Doses Of Nitrogen, Ciênc. agrotec., Lavras. 6(27): 1246-1252.

Sadeghian, K, S. 2008. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia, Guía Práctica. Boletín técnico No. 32. Cenicafe. ISSN -0120-047X.

Sadeghian, K. S. y González, O. H. 2012. Alternativas generales de fertilización para cafetales en etapa de producción. Avances técnicos Cenicafe Número 4244. ISSN -0120-0178.

Valencia, G. A. 1992. Fertilización de los cafetales. Avances técnicos Cenicafe Número 175. ISSN 0180-0178.

Zamora, M. B. P.; Sánchez, G. P.; Volke H. V. H.; Espinosa, V. E.; Galvis, S. A. 2005. Formulación de mezclas de sustratos mediante programación lineal. [Citado el 30 de mayo de 2013], Disponible para World Wide Web: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33910509>.

IndexMundi. Fertilizantes. [Fecha de consulta: 28 febrero 2014]. Disponible en: <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=urea&meses=60>.

3.2 MODELOS NEURONALES Y ARIMA EN LA ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DEL CAFE (*Coffea*)

NEURAL AND ARIMA MODELS IN ESTIMATING THE WORLD COFFEE (*Coffea*) PRODUCTION

Marlio Bedoya-Cardoso*¹, Raquel Salazar Moreno, Cristóbal Martin Cuevas Alvarado

RESUMEN

El café (*coffea*) es un dinamizador de la economía en las regiones donde se cultiva, es el producto agrícola más importante que se comercializa en el mercado de futuros de Nueva York y Londres. El café (*coffea*) enfrenta riesgos diversos, la volatilidad del precio, que depende de la oferta, la demanda, y factores especulativos. El riesgo de la tasa de cambio depende de políticas monetarias y del mercado. Finalmente, el riesgo de producción depende de factores económicos, ambientales y culturales. Estos riesgos, generan problemas en los países donde se cosecha este producto, pues dependen ampliamente de sus exportaciones. Una herramienta que permita estimar el comportamiento de este mercado, sería útil para diseñar políticas públicas dirigidas a mitigar el impacto negativo que pueda causar el mercado. Las redes neuronales artificiales (RNA) serían una mejor alternativa para predecir esta actividad en comparación con los modelos autoregresivos integrados con promedios móviles (ARIMA). En el presente estudio se emplearon redes

¹ División de Ciencias Económico Administrativas, Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo. Estado de México. (marlio.bedoya@gmail.com) * Autor de Correspondencia, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo. Estado de México. (raquels60@hotmail.com), Arboledas 28, Montecillo, Edo. de México, (cuevas_cristobal@hotmail.com).

neuronales estáticas y dinámicas, así como, los modelos ARIMA con el objetivo de predecir la producción mundial de café y determinar el que predice con exactitud mayor. Para los modelos neuronales se utilizaron 41 variables explicativas, y contaban con una sola capa oculta en su estructura. Los modelos ARIMA se construyeron con la variable a explicar, pero con sus valores atrasados. La red neuronal estática mejoró el desempeño de la red neuronal dinámica y los modelos ARIMA, de acuerdo con los resultados estadísticos de bondad de ajuste como el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (MSE), el error medio absoluto, (MAE) y la eficiencia del modelo (EF).

Palabras Clave: Predicción, NARX, Feed Forward, commodities, Café Arábica y Robusta.

INTRODUCCIÓN

El cultivo del café (*coffea*) ocupa mano de obra abundante, y tiene gran impacto en la economía de varios países de América Latina. Este es el caso, actual en Colombia, donde 563 mil familias viven directamente de la producción del café y las actividades de manejo, cosecha y post-cosecha ocupan más de 9% de su población activa (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2013; Banco Mundial, 2016). Cano *et al.* (2012) afirman que la industria del café en Colombia genera uno de cada tres empleos rurales y permite que dos millones de personas vivan directamente de ella. Además, el café hace las contribuciones mayores al producto interno bruto agrícola de América Latina (Laderach *et al.*, 2011).

Así como en América Latina, el cultivo del café es un renglón muy importante en las economías de los países donde se produce, como es el caso de algunos países africanos, donde el comercio depende en un alto grado de sus exportaciones de café, llegando a constituir en algunos países hasta el 70% de las exportaciones (Observatorio de corporaciones transnacionales, 2006).

Deaton y Laroque (1992) trabajaron un modelo de almacenamiento competitivo estándar de expectativas racionales para 13 productos agrícolas, manifestando que, para algunos productos se han producido cambios desde pico-valle en tan sólo unos meses. Asimismo, para los países cuyos ingresos de exportación y PIB dependen de estos productos básicos, la volatilidad plantea importantes problemas para las políticas macroeconómicas y microeconómica.

Chatrath *et al.* (2002) mencionan que se han encontrado fuertes evidencias que los mercados de los productos básicos agrícolas (commodities), se comportan como sistemas caóticos. Kowalik *et al.* (2014) emplearon y compararon un método basado en una regresión de mínimos cuadrados parciales para estimar el rendimiento de trigo en Europa a partir de imágenes satelitales de baja resolución (FAPAR y NDVI), contra las estadísticas oficiales de producción, y encontraron que el método propuesto puede ser utilizado operacionalmente para la estimación del rendimiento de trigo con una precisión razonable sobre una gran parte de Europa.

Villers *et al.* (2009) descubrieron que las variables meteorológicas, como la precipitación, la temperatura y la radiación solar, desempeñan un papel importante en el desarrollo fenológico y funcionan como reguladores de las plantas, en los procesos de floración y desarrollo de frutos. Otros investigadores (Kowalik *et al.* 2014; Rivera *et al.* 2013) encontraron que el cambio climático y sus efectos sobre la agricultura son aspectos importantes al momento de predecir los commodities.

En Brasil algunos consultores emplean personal capacitado y un método volumétrico para estimar la zafra o cosecha de café; en Colombia la Federación Nacional de Cafeteros utiliza un método destructivo para el pronóstico de la cosecha, lo cual requiere de tiempo y dinero.

Las variables meteorológicas y de rendimiento de los productos agrícolas son almacenadas en bases de datos, convirtiéndose en series de tiempo, definidas como, una sucesión de

observaciones medidas en diferentes instantes de tiempo, las cuales puede ser clasificadas como series estacionarias o no estacionarias, con comportamiento lineal o no lineal. Por ende, se requiere de modelos matemáticos que puedan explicar el comportamiento de dichas series de tiempo, tales como: las redes neuronales artificiales y los modelos ARIMA.

La posibilidad de adoptar herramientas computacionales o de análisis de series de tiempo para determinar el comportamiento y la producción de productos agrícolas involucrando variables explicativas, serían fundamentales para el diseño de políticas públicas en comparación a los modelos de una sola variable. Basado en lo anterior, en el presente trabajo de investigación se utilizaron redes neuronales artificiales de prealimentación o feed-forward (Estáticas) y redes recurrentes o feedback (Dinámicas), así como, modelos ARIMA con el objetivo de determinar cuál de ellos es el mejor predictor de la producción mundial del café, teniendo en cuenta el desempeño estadístico del modelo.

Las redes neuronales artificiales son metodologías utilizadas en numerosas series de tiempo para realizar predicciones, por ejemplo, Yildirim *et al.* (2011) emplearon redes neuronales para determinar el rendimiento mensual en el sector de papel en Estambul. Y recientemente, otros investigadores (Meena y Agrawal, 2015; Salim *et al.*, 2015) utilizaron redes neuronales para determinar el nivel de la marea.

Los modelos ARIMA son técnicas de modelado lineal, en la cual, se debe verificar la estacionariedad de la serie de tiempo. Si la serie de tiempo no es estacionaria, se deben realizar las diferencias que sean necesarias para volver la serie estacionaria. Si se realizan d diferenciaciones, se dirá que el orden de integración (I) del modelo ARIMA será d veces. Los datos resultantes, son modelados como un proceso autorregresivo de promedios móviles (ARMA). El modelo ARMA

más sencillo de explicar, es el siguiente: si y_t sigue un proceso ARMA (1,1) se puede escribir así:

$$y_t = \alpha + \beta_1 y_{t-1} + \gamma_0 \mu_t + \gamma_1 \mu_{t-1} \quad (1)$$

La ecuación anterior quiere decir que y_t está en función de una constante (α) más un coeficiente autorregresivo (β_1) de su valor pasado ($t - 1$), más un promedio móvil de los términos de error presente y pasado. El modelo ARMA asume que la secuencia de errores μ_t tiene ruido blanco y sigue la distribución gaussiana, por lo tanto, la varianza de estos errores es también un parámetro del modelo (Babu y Reddy, 2014).

Lo más importante de los modelos ARIMA, es que la variable exógena del modelo a construir, son los valores pasados de la misma variable de estudio, lo cual ha causado críticas para el análisis de las series de tiempo, ya que no toman en cuenta otras variables explicativas que están relacionadas con el fenómeno a explicar (Hossain *et al.*, 2006). La identificación, estimación del modelo, la comprobación del diagnóstico y la predicción con el modelo final, son los cuatro pasos de un ciclo iterativo que hace parte de la metodología de Box-Jenkins o modelos ARIMA (Kohzadi, 1996).

Los modelos ARIMA son ampliamente utilizados en el mundo para el análisis y predicción de series de tiempo en economía, en el sector primario y en la industria, por ejemplo, en economía e industria, Ramos *et al.* (2015) emplearon un modelo de espacio de estados y un modelo ARIMA para determinar el precio al por menor de 5 diferentes tipos de calzado femenino. En el sector primario, Kumar y Jain (2010) emplearon los modelos ARIMA para determinar cuatro contaminantes del aire en India. Y Valipour *et al.* (2013) emplearon modelos ARIMA para comparar

su poder predictor y formar un modelo híbrido con redes neuronales para predecir la entrada de agua a una presa.

Una vez seleccionado el modelo, se debe considerar como evaluar su desempeño para determinar que tan bien el modelo representa las respuestas de un sistema o se ajusta a una a una base de datos. Cuando se usa más de una técnica de predicción, las medidas de desempeño ayudan a discriminar entre los modelos usados (Montgomery *et al.*, 2011).

La evaluación es importante para el uso potencial del modelo, ya que, el investigador necesita información acerca de la calidad del modelo para decidir qué tanta credibilidad debe darle al modelo. La evaluación es una de las principales actividades en todo trabajo de modelación, pero particularmente para modelos en agronomía (Wallach *et al.*, 2013).

El coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (MSE), el error medio absoluto (MAE) y la eficiencia (EF) son empleadas como medidas estadísticas para determinar el desempeño de los modelos. Las fórmulas de estas medidas de evaluación se muestran a continuación.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (4)$$

$$EF = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5)$$

MATERIALES Y MÉTODOS

La información para el pronóstico de la producción mundial del café fue obtenida por la Organización Internacional del Café (ICO) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO) corresponde al periodo entre los años 1961 y 2014 (FAOSTAT, 2015).

Los datos meteorológicos desde 1961 hasta el año 2014, se consiguieron con el Instituto Nacional de Meteorología de Brasil (INMET), estos fueron la precipitación y la temperatura máxima y mínima de 4 estaciones climatológicas ubicadas en la zona cafetera de Brasil.

La base de datos de insumos agrícolas se adquirió de la página oficial de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO) desde 1961 hasta el año 2014, para Brasil, Colombia, Indonesia y Vietnam. Posteriormente, toda la información (variables) se organizó y almacenó en una hoja de cálculo de Microsoft Excel 2013.

Las variables de entrada para la construcción de los modelos de redes neuronales (estáticas y dinámicas) en el programa Matlab 2014b fueron 42, dentro de las cuales se tiene: La producción, el área cosechada de café, los rendimientos por hectárea, y la cantidad de fertilizantes empleados cada año por Brasil, Colombia, Indonesia y Vietnam, asimismo, se tuvieron en cuenta variables climáticas como las precipitaciones, la temperatura máxima y mínima de 4 estaciones climáticas de Brasil.

Los dos tipos de redes neuronales se construyeron con una sola capa oculta y el número máximo de neuronas en la capa oculta se determinó siguiendo la metodología propuesta por Masters (1993) ($h=\sqrt{mn}$), donde n es el número de variables de entrada y m es el número de salidas, para este trabajo $m = 1$.

La función empleada en la red estática fue “newff” y para la red dinámica “narx”. En los dos

modelos de redes neuronales se trabajó con la función de transferencia Tangente Hiperbólica, de igual forma, la función de entrenamiento fue Levenberg-Marquardt backpropagation y la función de aprendizaje fue la del gradiente descendente por impulso, posteriormente, la información se dividió en 80% para los procesos de validación cruzada (entrenamiento, validación y prueba) y 20% para la estimación de la producción mundial del café. Finalmente, el 80% de la información destinada para el proceso de entrenamiento, validación y prueba se dividió en tres tandas (50-25-25; 60-20-20; 70-15-15), con el objetivo de determinar en cuál de estas proporciones se genera el mejor modelo de red neuronal artificial.

Para estimar y validar el modelo ARIMA en el programa Eviews 7, se hizo uso de las funciones de autocorrelación (FAC) y autocorrelación parcial (FACP), asimismo, para la selección del modelo, se tuvo en cuenta el criterio de información de Akaike (AIC), el criterio de Schwarz (SC), y los estadísticos del MAE y la EF en la estimación de la producción mundial del café.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se estimaron y validaron 9 modelos de ellos, el mejor fue el ARIMA (1,2,1) de acuerdo con la eficiencia (EF) y el error medio absoluto (MAE) del modelo, que fue 285 mil toneladas de café verde, El Cuadro 1.

El modelo ARIMA seleccionado se puede escribir de la siguiente forma:

$$ProdCoffee_t = 3.18 - 0.58ProdCoffee_{t-1} - 0.96\varepsilon_{t-1} \quad (7)$$

Los otros dos criterios empleados (AIC y SC) para seleccionar el mejor modelo ARIMA imponen una penalización al añadir regresores al modelo, con el fin de reducir la suma de cuadrados residuales. Por lo anterior, se debe seleccionar el modelo que tenga los menores

valores de estos dos criterios. Asimismo, Gujarati y Porter (2010) mencionan, que la ventaja del AIC es que sirve para determinar el desempeño de la predicción dentro y fuera de la muestra de los datos empleados.

Cuadro 1. Selección del mejor modelo ARIMA

Estimación de la Producción Mundial de Café (2004-2014)				
Modelo	AIC	SC	EF	MAE
ARIMA (1,1,3)	15.57	15.68	0.69	306
ARIMA (1,1,4)	15.57	15.68	0.68	327
ARIMA (1,2,1)	15.61	15.72	0.74	285
ARIMA (2,1,1)	15.39	15.50	0.69	312

AIC: Criterio de Información de Akaike; SC: Criterio de Schwarz; EF: Eficiencia del modelo; MAE: Error medio Absoluto.

Sin embargo, en este trabajo se contrasta lo dicho por Gujarati y Porter (2010), ya que, el modelo ARIMA (2,1,1) obtuvo un AIC de 15.39 y el modelo seleccionado ARIMA (1,2,1), alcanzó un AIC de 15.61, y un mejor desempeño estadístico (MAE y EF), en comparación con el modelo ARIMA (2,1,1).

El modelo ARIMA (1,2,1) describe la tendencia o el comportamiento que ha tenido la oferta de café en el mundo, sin embargo, en muy pocos periodos el modelo predice con exactitud la cantidad de café producida cada año (Figura 2).



Figura 2. Estimación mundial de la producción de café con el modelo ARIMA (1,2,1)

Con respecto, a la red neuronal estática, se obtuvo el mejor resultado en la estimación mundial del café utilizando cuatro neuronas en la capa oculta y distribución de datos (60-20-20) para el proceso de entrenamiento validación y prueba. Por otro lado, la red neuronal dinámica logra su mejor desempeño con cinco neuronas en la capa oculta y distribución de datos (50-25-25) para el proceso de entrenamiento, validación y prueba, en la estimación de la producción mundial del café.

Comparando los modelos de las redes neuronales empleadas (dinámica y estática), el que logró mejores resultados en la estimación de la producción mundial de café, fue la red estática, ya que, en ella se alcanzaron los errores más pequeños en las predicciones, según los estadísticos de MSE y el MAE. Asimismo, se alcanzó un mayor valor del coeficiente de determinación (R^2) y eficiencia (EF) del modelo (Cuadro 2).

Estos resultados son diferentes a los publicados por Sundermeyer et al., (2013) y Valipour et al., (2013) en el cual, la red recurrente o dinámica superó a la red neuronal estática. Asimismo,

Salim et al. (2015) en su trabajo emplearon los mismos tipos de redes usadas en este trabajo, para predecir el nivel de la marea cada hora en las costas de Mangalore en India, y la red dinámica (NARX) superó a la red estática, en términos de exigencia de información, precisión en los resultados y menor tiempo de cálculo.

Cuadro 2. Selección del modelo neuronal

Tipo de Red	Entrenamiento, validación y prueba				Estimación de la producción mundial de café (2004-2014)			
	R ²	MSE	MAE	EF	R ²	MSE	MAE	EF
Estática	0.962	38463	109	0.951	0.932	40295	166	0.904
Dinámica	0.980	20240	80	0.980	0.912	52391	189	0.902

R²: Coeficiente de determinación; MSE: Error cuadrático medio; MAE: Error medio absoluto; EF: Eficiencia del modelo.

A pesar de, lo publicado por Salim et al. (2015) en este trabajo se contrastan sus conclusiones, especialmente los relacionados con la precisión de resultados y tiempo de simulación, éste último fácil de rebatir, debido a que, el retardo en la red dinámica duplica el número de parámetros de la entrada, lo cual requiere de mayor tiempo para calcularlos. Por otra parte, el efecto de retardo de la salida como entrada en la red dinámica no ayudó a mejorar la predicción, como sí lo hizo en los trabajos mencionados anteriormente.

Las redes neuronales empleadas en este trabajo describieron con mayor exactitud el comportamiento del mercado mundial del café, en comparación con el modelo ARIMA (1,2,1), pues, se estimó con menor error la cantidad de café producida cada año (Figura 3).

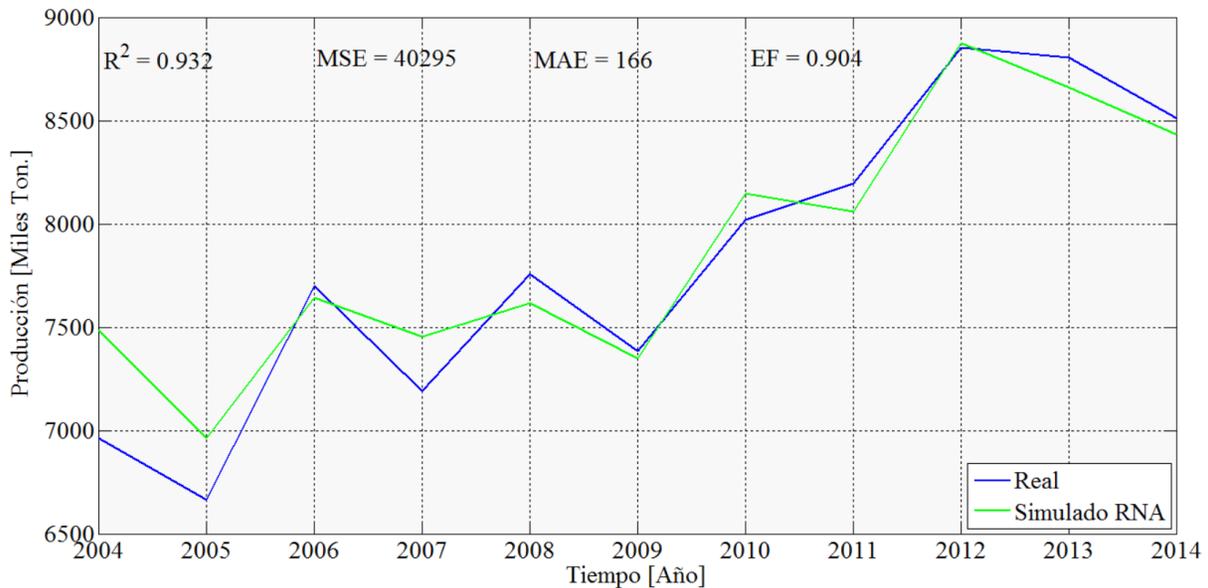


Figura 3. Estimación mundial de la producción de café con una RNA estática

De los modelos probados en este trabajo, las redes neuronales consiguieron mejores resultados en los estadísticos seleccionados para evaluar el desempeño del modelo en contraste con el modelo ARIMA (1,2,1).

En un trabajo realizado por Kohzadi *et al.* (1996) compararon el poder predictivo de las redes neuronales y los modelos ARIMA para determinar el precio mensual de dos productos básicos, encontrando resultados similares a los obtenidos en este trabajo.

Bahrammirzaee (2010), en su estudio comparativo en evaluación de créditos, manejo de portafolios y predicciones financieras en lista más de 40 trabajos de investigación, donde las redes neuronales tienen mejor desempeño que otros métodos.

De igual forma, la red neuronal estática logró los menores errores absolutos relativos en la estimación cada año de cosecha cafetera, alcanzando, un error mínimo de estimación de la producción mundial de café de 0.2% en el año 2012 y un error máximo de 7.5% en el año 2004 (ver Cuadro 3).

Cuadro 3. Errores relativos de los modelos empleados y repor

Modelo	Año de cosecha										
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
ARIMA (1,2,1)	2.2 %	1.8 %	9.0 %	1.5 %	0.9 %	3.4 %	2.7 %	4.0 %	6.0 %	0.9 %	6.9 %
RNA Estática	7.5 %	4.5 %	0.7 %	3.6 %	1.8 %	0.5 %	1.6 %	1.7 %	0.2 %	1.6 %	0.9 %
RNA Dinámica	2.7 %	4.8 %	0.4 %	4.1 %	5.5 %	1.8 %	2.3 %	2.0 %	1.7 %	1.5 %	0.8 %
(Conab, 2016)		1.2 %	1.6 %	0.6 %	1.4 %	1.0 %	1.4 %	1.4 %	1.7 %	1.6 %	1.8 %

ARIMA: Modelo autorregresivo integrado de promedio móviles; RNA: red neuronal artificial

(Conab: Compañía Nacional de Abastecimiento. Brasil).

Aunque la red dinámica logra un error máximo relativo de 5.5% en el año 2008, el error relativo absoluto promedio entre los años 2004 y 2014 es de 2.25% para la red estática y 2.45% para la red dinámica.

Los resultados logrados con la red neuronal estática para estimar la producción mundial del café son satisfactorios, comparándolos con los errores de predicción que hace la compañía nacional de abastecimiento (Conab) a principios de cada año para estimar la producción cafetera en Brasil entre el año 2005 y 2014; ya que, en cuatro periodos (2006-2009-2012-2014) el error de la red neuronal estática fue menor que el publicado por Conab (Cuadro 3).

CONCLUSIONES

La red neuronal artificial estática fue el modelo que predijo con mayor exactitud el comportamiento del mercado del café entre los años 2004 y 2014, teniendo en cuenta los

resultados de los estadísticos de bondad de ajuste, en comparación, con la red neuronal artificial dinámica y los modelos ARIMA. De igual forma, puede ser usada como una herramienta fundamental en la toma de decisiones para el diseño de políticas públicas dirigidas a esta actividad agrícola, que mitiguen el impacto negativo que el mercado pueda generar sobre los ingresos de las familias que se dedican a esta actividad.

AGRADECIMIENTO

A la Organización Internacional del Café (ICO), por facilitar información relevante para el desarrollo de este trabajo.

LITERATURA CITADA

Babu, C. N., and B.E. Reddy. 2014. A moving-average filter based hybrid ARIMA–ANN model for forecasting time series data. *Appl. Soft Comp.* 23: 27-38.

Bahrammirzaee, A. 2010. A comparative survey of artificial intelligence applications in finance: artificial neural networks, expert system and hybrid intelligent systems. *Neural Comp. Appl.* 19(8), 1165-1195.

Banco Mundial. 2016. Datos. Población activa, total. Recuperado el 19 de enero de 2016, en <http://datos.bancomundial.org/indicador/SL.TLF.TOTL.IN>

Cano, S. G. C., C. M. Vallejo, E. G. Caicedo, J. S. T. Amador, y Y. C. E Tique. 2012. El mercado mundial del café y su impacto en Colombia (No. 009612). BANCO DE LA REPÚBLICA. Bogotá, Colombia. 56 p.

Chatrath, A., B. Adrangi, and K. K. Dhanda, 2002. Are commodity prices chaotic? *Agric. Econ.* 27(2), 123-137.

Compañía Nacional de Abastecimiento (Conab). 2015. Levantamiento de Safra. Brasil.

<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=> (consulta: enero 2016)

Deaton, A., and G. Laroque. 1992. On the behaviour of commodity prices. *The Rev. of Econ. Stud.* 59(1), 1-23.

Gujarati, D., and D. Porter. 2010. *Econometría (quinta Edición)*. México: Editorial Mc. Graw Hill. 921p.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2013. Al grano. El sector cafetero es motor de la economía y garantía de estabilidad y paz social.

http://www.federaciondecafeteros.org/algrano-fnc-es/index.php/comments/el_sector_cafetero_es_motor_de_la_economia_y_garantia_de_estabilidad_y_paz_/ (Consulta: enero de 2016).

Hossain, Z., Q. Abdus-Samad, and Z. Ali. 2006. ARIMA model and forecasting with three types of pulse prices in Bangladesh: a case study. *Int. J. of Soc. Econ.* 33(4), 344-353.

Kohzadi, N., M. S. Boyd, B. Kermanshahi, and I. Kaastra. 1996. A comparison of artificial neural network and time series models for forecasting commodity prices. *Neurocomputing*, 10(2), 169-181.

Kowalik, W., K. Dabrowska-Zielinska, M. Meroni, T. U. Raczka, and A. Wit. 2014. Yield estimation using SPOT-VEGETATION products: A case study of wheat in European countries. *Int. J. of Appl. Earth Observation and Geoinformation*, 32: 228-239.

Kumar, U., and V. K. Jain. 2010. ARIMA forecasting of ambient air pollutants (O₃, NO, NO₂ and CO). *Stoch. Environ. Res. and Risk Assessment*. 24(5), 751-760.

Laderach, P., M. Lundy, A. Jarvis, J. Ramirez, E. P. Portilla, K. Schepp, and A. Eitzinger. 2011.

Predicted impact of climate change on coffee supply chains (pp. 703-723). Springer Berlin

Heidelberg.

Masters, T. 1993. Practical neural network recipes in C++. Morgan Kaufmann. 490p.

Meena, B. L., and J. D. Agrawal. 2015. Tidal Level Forecasting Using ANN. *Procedia Eng.* 116: 607-614.

Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Kulahci, M. 2011. Introduction to time series analysis and forecasting (Vol. 526). John Wiley & Sons. 441 p.

Observatorio de Corporaciones transnacionales. 2006. Boletín N, 14. El mercado Internacional del café. 47p. <http://cenida.una.edu.ni/relectronicos/REE71156.pdf> (Consulta: octubre 2013).

Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Dirección Estadística (FAOSTAT). 2014. Descargar Datos. Producción. Cultivos. <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/S> (Consulta: junio de 2015).

Ramos, P., N. Santos, and R. Rebelo. 2015. Performance of state space and ARIMA models for consumer retail sales forecasting. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 34: 151-163.

Rivera, M. D. R. S., I. N. Gavrilov, M. A. Castrillón, V. M. C. Ordaz, Díaz, G. P., and R. A. P. Guajardo. 2013. VULNERABILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DEL CAFÉ (*Coffea arabica* L.) AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL. *Terra Latinoamericana*, 31: 305-313.

Salim, A. M., G. S. Dwarakish, K. V. Liju, J. Thomas, G. Devi, and R. Rajeesh. 2015. Weekly Prediction of Tides Using Neural Networks. *Procedia Eng.* 116: 678-682.

Sundermeyer, M., I. Oparin, J. L. Gauvain, B. Freiberger, R. Schluter, and H. Ney. (2013). Comparison of feedforward and recurrent neural network language models. In *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE International Conference on* (pp. 8430-

8434). IEEE.

Villers, L. V. R., N. Arizpe, R. Orellana, and J. Hernández. 2009. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia: Rev. de cienc. y tecnología de América*, 34(5), 322-329.

Valipour, M., M. E. Banihabib, and S. M. R. Behbahani. 2013. Comparison of the ARMA, ARIMA, and the autoregressive artificial neural network models in forecasting the monthly inflow of Dez dam reservoir. *J. Hydrol.* 476: 433-441.

Wallach, D., D. Makowski, J. W. Jones, and F. Brun. 2013. *Working with Dynamic Crop Models: Methods, Tools and Examples for Agr. and Environ.* Acad. Press. 487 p.

Yildirim, I., S. Ozsahin, and K. C. Akyuz. 2011. Prediction of the Financial Return of the Paper Sector with Artificial Neural Networks. *BioResources*, 6(4).

3.3 SIMULACIÓN DEL PRECIO DIARIO DEL CAFÉ (*Coffea*) SUAVE COLOMBIANO EN EL MERCADO AMERICANO

DAILY COLOMBIAN MILDS COFFEE (*Coffea*) PRICE SIMULATION IN THE AMERICAN MARKET

Marlio Bedoya-Cardoso^{*2}, Raquel Salazar Moreno³, Mary M. Poulton⁴

RESUMEN

La simulación y predicción de series de tiempo con modelos matemáticos y probabilísticos en la economía actualmente es una gran herramienta para la toma de decisiones en numerosas actividades. Contar con un modelo que pueda anticipar el comportamiento de una serie de tiempo sería una herramienta fundamental para manejar las actividades económicas. Las redes neuronales artificiales (RNA) podrían ser una opción para determinar el comportamiento del precio del café (*Coffea*) suave colombiano en el mercado americano con precisión mayor en comparación al modelo autorregresivo integrado de promedios móviles con variables exógenas (ARIMAX). En el presente estudio, redes neuronales estáticas y dinámicas y modelos ARIMAX se usaron con el objetivo de simular el precio diario del café suave colombiano en el mercado americano y establecer el modelo que simula con grado de exactitud mayor. Por lo tanto, emplear este tipo de modelos usando variables meteorológicas de la zona cafetera de Brasil y Colombia en la simulación del precio diario del café suave colombiano podría arrojar buenos resultados. Se

² División de Ciencias Económico Administrativas, Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo. Edo de México. (marlio.bedoya@gmail.com) * Autor de Correspondencia

³ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo. Edo de México. (raquels60@hotmail.com).

⁴ The University of Arizona, College of Engineering, United State of America, P.O. Box 210012, fax 520 621 8330 (mpoulton@email.arizona.edu).

utilizaron 31 variables de entradas, una capa oculta y una de salida (precio) para los modelos neuronales. Los modelos ARIMAX se construyeron con seis variables relevantes en la explicación del precio diario del café suave colombiano. La red neuronal estática (RNAE) superó el desempeño estadístico de la red neuronal dinámica (RNAD) y el modelo ARIMAX y alcanzó un error medio absoluto (MAE) de 0.105 centavos de dólar en los cuatro años en los que se realizó la simulación. Los modelos neuronales son más versátiles que los modelos autorregresivos integrados de promedios móviles con variables exógenas, ya que, emplean más variables de entrada sin la necesidad de volverlas estacionarias.

Palabras Clave: Predicción, redes neuronales, ARIMAX, *Coffea*.

INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea*) es el producto agrícola más importante que se comercializa en las diferentes bolsas de valores de Nueva York y Londres. Pelupessy (2007) afirma que el café es transcendental para 25 millones de pequeños productores de 60 países tropicales. Gran parte de la economía campesina donde se cultiva el café depende ampliamente de él, incluso para algunos países africanos puede representar más del 50 % de sus ingresos totales de exportación (Love, 1999).

En el año cafetero 2014/15, Brasil, Vietnam, Colombia e Indonesia proporcionaron más del 66 % del producto internacional. Por lo tanto, los cambios en la producción de estos países (principalmente Brasil) puede influir fuertemente en su cotización (ICO, 2016a).

Los factores que generan inestabilidad en el precio del café en los diferentes mercados están asociados a las condiciones climáticas, acuerdos internacionales y la acumulación de existencias en países productores y consumidores, lo cual provoca un riesgo para aquellos países en vía de

desarrollo como Colombia, en el cual, esta actividad agrícola participa de forma importante en las exportaciones del país (García, 2003).

Estimar el comportamiento del precio del café en los mercados, con base en series de tiempo sería una herramienta de apoyo para generar políticas públicas dirigidas a mitigar el impacto negativo que éste pueda causar en los ingresos de las personas que se dedican a esta actividad del sector primario.

Las series de tiempo clasifican en series estacionarias o no estacionarias con comportamiento lineal o no lineal. Por lo anterior, la explicación del comportamiento de dichas series de tiempo puede hacerse a través de modelos Autorregresivos Integrados de Promedios móviles con variables Exógenas (ARIMAX) y las Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Un modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) o modelo Box-Jenkins es un tipo de modelo que describe el comportamiento de la serie de tiempo y son particularmente exitosos y poderosos para realizar pronósticos, superando a los modelos de ecuaciones simultáneas en el desempeño de las predicciones y son adecuados para predicciones a corto plazo (Brandt, 2007; Pankratz, 2009).

Los modelos ARIMAX son una variante de los modelos ARIMA en el cual se usan variables exógenas que ayudan a explicar el comportamiento de una serie de tiempo, cuando la serie no se puede explicar con sus mismos valores retrasados. Los modelos ARIMAX se han empleado últimamente en muchas disciplinas por su mejor desempeño en las predicciones en comparación con los modelos ARIMA, por ejemplo, Pektaş y Cigizoglu (2013) emplearon modelos ARIMA, ARIMAX, redes neuronales y modelos Híbridos para determinar el coeficiente de escurrentía mensual de siete cuencas hidrográficas en Turquía. De igual forma, De Felice *et al.* (2013) usaron

modelos ARIMA y ARIMAX para predecir la demanda de energía en Italia en la temporada de verano.

Kordon (2014) empleó modelos ARIMAX y programación genética para pronosticar el precio mensual de las materias primas y formar un modelo híbrido que mejore las predicciones. Recientemente, Maggina (2015) empleó modelos contables de investigación y modelos ARIMAX para explicar los rendimientos de las acciones en el mercado de Grecia.

Por otra parte, las redes neuronales artificiales representan una tecnología y se han encontrado en áreas tan diversas como la neurofisiología, física, ingeniería biomédica, ingeniería electrónica, ciencias de la computación, acústica, cibernética, robótica, procesamiento de imágenes, finanzas y otras (Haykin, 1994; Govindaraju, 2000).

El enfoque de la red neuronal artificial juega un papel importante en construir modelos cuantitativos y es uno de los métodos más usados para predecir variables y es importante para la toma de decisiones, en los últimos años se ha utilizado como un método con alto nivel de validación en el campo de la economía y las predicciones financieras (Veselý, 2011; Yildirim *et al.*, 2011).

Las redes neuronales artificiales son metodologías utilizadas en numerosas series de tiempo para realizar predicciones, por ejemplo: Pino y Parreño (2005) emplearon redes neuronales para determinar el precio de la energía en España. Yildirim *et al.* (2011) utilizaron redes neuronales para determinar el rendimiento mensual en el sector de papel en Estambul. Hu *et al.* (2012) también aplicaron redes neuronales para predecir el precio en los futuros del petróleo. Sundermeyer *et al.* (2013) utilizaron redes neuronales para el reconocimiento de voz francesa, recientemente, otros investigadores (Meena y Agrawal, 2015; Salim *et al.*, 2015) hicieron uso de las redes neuronales para determinar el nivel de la marea.

En el estudio del mercado del café, García (2003) empleó redes neuronales artificiales para el análisis y predicción del precio mensual externo del café colombiano, de igual forma, Velásquez y Aldana (2007) usaron redes neuronales y otros modelos de predicción para modelar el precio mensual del café colombiano en la bolsa de New York; afirmando que los resultados no fueron satisfactorios desde el punto de vista de la modelación.

El presente estudio utilizó modelos autorregresivos integrados de promedios móviles con variables exógenas (ARIMAX), y redes neuronales artificiales estáticas y dinámicas (RNA), con el objetivo de simular el precio diario del café suave colombiano en el mercado americano y establecer el modelo que simula con grado de exactitud mayor, involucrando variables meteorológicas de la zona cafetera de Brasil y Colombia que podrían mejorar la comprensión y predicción en dicho mercado.

En el presente estudio, se utilizaron las medidas estadísticas de ajuste propuestas por Montgomery *et al.* (2011) y Wallach *et al.* (2013), el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrado medio (MSE), el error medio absoluto (MAE) y la eficiencia (EF) para determinar el desempeño de los modelos. Las fórmulas de estas medidas de evaluación se muestran a continuación.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \widehat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \widehat{Y}_i)^2 \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \widehat{Y}_i| \quad (3)$$

$$EF = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \widehat{Y}_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4)$$

MATERIALES Y MÉTODOS

La información para la simulación del precio diario del café suave colombiano en el mercado americano fue obtenida por la Organización Internacional del Café (ICO), por YAHOO finanzas y por el Banco de la Reserva Federal de los Estados Unidos (FRED). Y corresponde al periodo entre el 01 de octubre de 1990 hasta el 30 de septiembre de 2014.

Los datos de temperatura y precipitación de cuatro estaciones climática en la zona cafetera de Brasil y siete en Colombia para el periodo de 01 de octubre de 1990 hasta el 30 de septiembre de 2014, se consiguieron en el Instituto Nacional de Meteorología de Brasil (INMET, 2015) y La Plataforma Agroclimática Cafetera en Colombia administrada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (AGROCLIMA, 2015).

Para la construcción de los modelos neuronales (estáticos y dinámicos) se emplearon 31 variables de entrada (económicas y no económicas) dentro de las cuales se tienen: El precio diario del café suave colombiano y los naturales arábigos brasileiros, Los indicadores bursátiles de Deutscher Aktienindex (DAX) de Alemania, Nikkei 225 de Japón, Down Jones Industries (DJI) y el Standard & Poor's 500 (S&P 500) de los Estados Unidos de América, ya que estos países importaron más del 44% del aromático en el periodo de estudio (ICO, 2016b). Asimismo, la precipitación y temperatura mínima de Brasil y la precipitación y temperatura máxima de la zona cafetera de Colombia.

La arquitectura de los modelos neuronales se construyó con una capa oculta y el número máximo de neuronas en ella se determinó empleando la metodología más empleada propuesta por Masters, (1993) ($h=\sqrt{m * n}$), donde n es el número de variables de entrada y m es el número de salidas, para este trabajo $m = 1$

La función empleada en la red estática fue “newff” y para la red dinámica “narx”. En los dos modelos de redes neuronales se trabajó con la función de transferencia Tangente Hiperbólica, de igual forma, la función de entrenamiento fue Levenberg-Marquardt backpropagation y la función de aprendizaje fue la del gradiente descendente por impulso. Los datos para la construcción del modelo se dividieron en 80% para el proceso de validación cruzada (entrenamiento validación y prueba) y el 20% para la simulación del modelo. También, tres distribuciones de datos se emplearon para el proceso de entrenamiento validación y prueba (50-25-25; 60-20-20; 70-15-15).

La construcción del modelo ARIMAX se realizó con seis variables de entrada, que se seleccionaron una vez aplicada la metodología de Olden y Jackson (2002), que consiste, en realizar un análisis de sensibilidad a los parámetros obtenidos por las redes neuronales, para determinar las variables más influyentes en la predicción del precio. Estas variables fueron: Los índices bursátiles de Deutscher Aktienindex (DAX) de Alemania, Nikkei 225 de Japón, Down Jones Industries (DJI), la tasa de cambio en dólares americanos, el precio de los naturales arábigos brasileños y la temperatura máxima en Chinchiná Calda.

La construcción de los modelos ARIMAX se hizo volviendo estacionaria todas las series de tiempo empleadas para la implementación del modelo, ellas son: las variables independientes explicativas (X) y la variable a explicar o serie de tiempo del precio diario del café suave colombiano.

Una vez establecido el modelo ARIMAX, se emplea la simulación Montecarlo, que consiste en un método de generar diversos resultados posibles con las mismas variables de entrada, gracias a que emplea una función aleatoria de números entre 0 y 1 (distribución uniforme), los cuales tienen dos propiedades. La primera es que todo número generado tiene la misma probabilidad de salir y la segunda propiedad, es que los números generados son estadísticamente

independientes. Basado en lo anterior, entre mayor sea el número de simulaciones N con los modelos ARIMAX se tendrá certeza de hallar un mejor modelo estimador, de esta forma, se construyeron los modelos con N= 10000 para simular el precio diario del café suave colombiano en el mercado americano.

En la selección del mejor modelo predictor del precio diario del café suave colombiano empleando la metodología ARIMAX, se realizaron los siguientes pasos propuestos por Box-Jenkins (1976): primero se identificó el modelo, luego, se estimaron los parámetros del modelo elegido, posteriormente, se realizó el examen de diagnóstico y finalmente la fase de pronóstico con las variables independientes y la variable dependiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de sensibilidad propuesto por Olden y Jackson (2002) aplicado a los resultados de las redes neuronales indicó que las tres variables más influyentes en el comportamiento del precio diario del café suave colombiano en el mercado americano son: el índice bursátil Nikkei 225 de Japón, Down Jones Industrie de Estados unidos de América y la tasa de cambio en dólares americanos. (Figura 1)

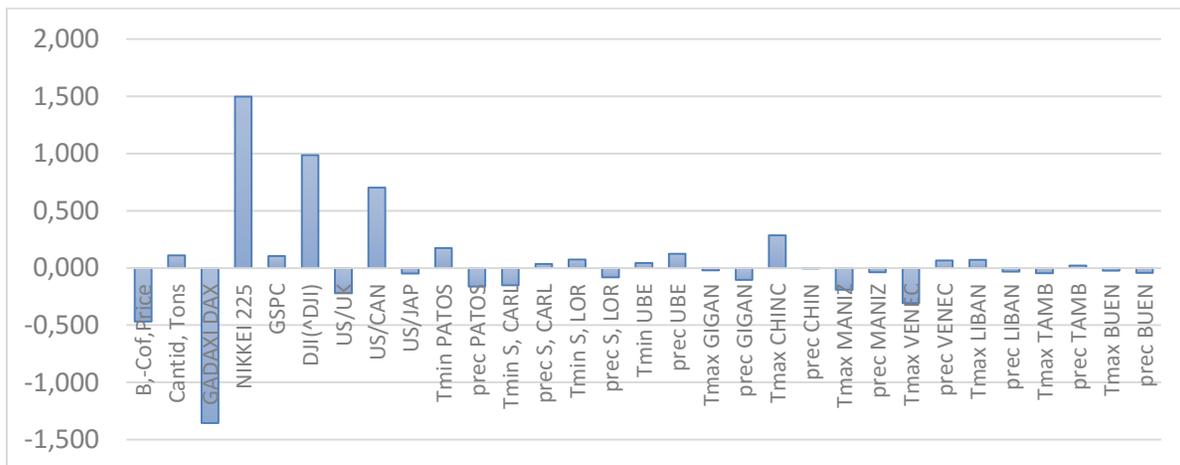


Figura 1. Variables influyentes en la simulación del precio diario

El modelo ARIMAX (1,1,1) se escogió debido al desempeño estadístico que se obtuvo. Sobre este modelo se realizaron 10000 simulaciones Montecarlo y el resultado más exacto en la estimación del precio diario del café suave colombiano en el mercado americano mostró que las variables exógenas están relacionadas con el comportamiento del precio del café suave colombiano (Figura 2).

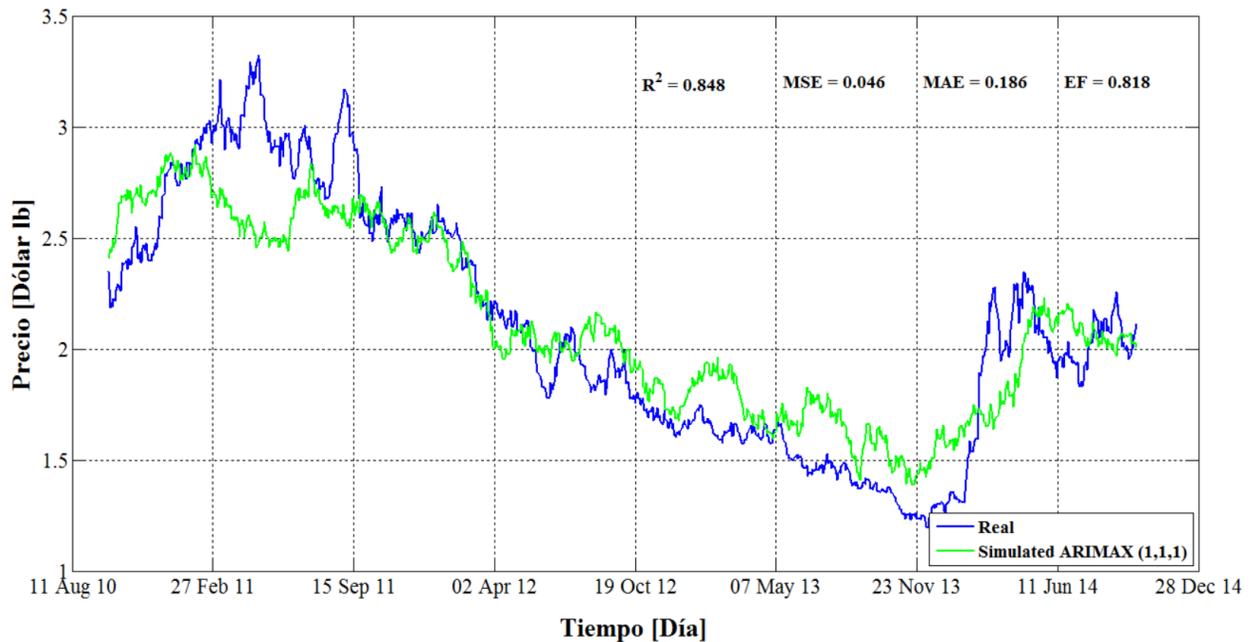


Figura 2. Simulación del precio diario del café suave colombiano con el modelo ARIMAX

El modelo ARIMAX (1,1,1) seleccionado se puede escribir mediante la ecuación cinco (5):

$$(1-0.0181)*(1-L)1yt=-0.0022+0.0034X1t-1-0.86e-7X2t-1-9.31e-8X3t-1+5.98e-7X4t-1-0.016X5t-1+5.8e-5X6t-1+(1-0.0019L) \varepsilon t \quad (5)$$

El mejor desempeño estadístico obtenido en la estimación del precio diario del café suave colombiano en el mercado americano empleando redes neuronales estáticas, se alcanzó con tres (3) neuronas en la capa oculta y distribución de datos 50-25-25, para la fase de construcción del

modelo neuronal o fase de entrenamiento, validación y prueba, en el cual se logró un error absoluto medio (MAE) de 0.105 centavos de dólar en el periodo analizado (Figura 3).

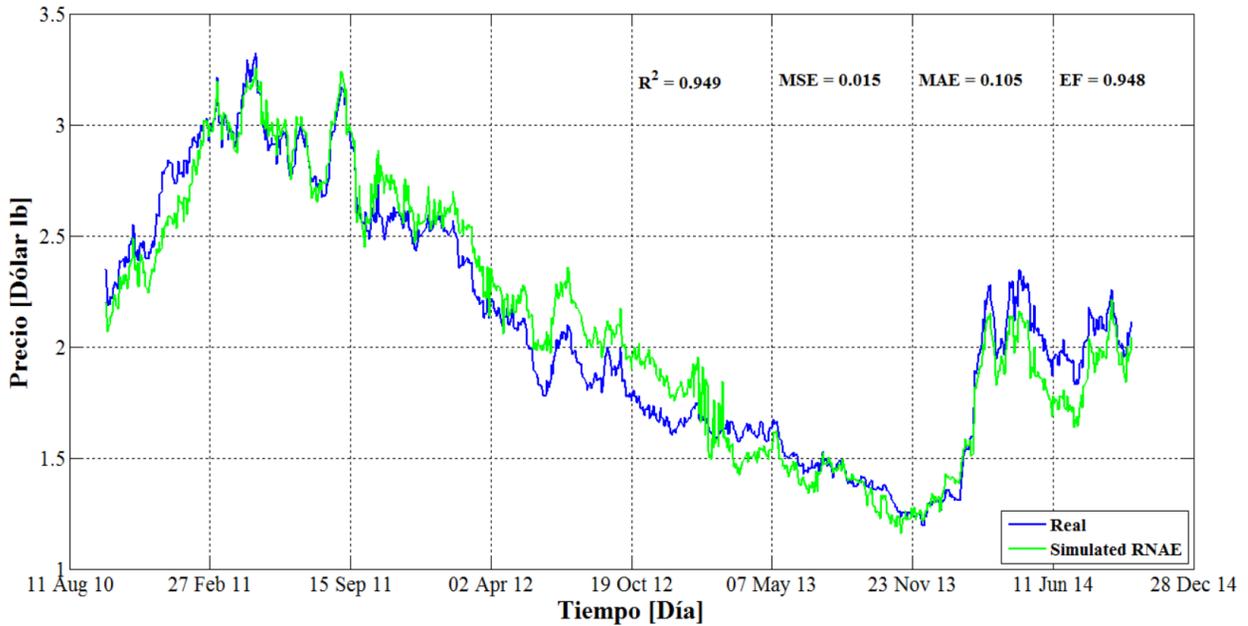


Figura 3. Simulación del precio diario del café suave colombiano con red neuronal estática

De igual forma, El modelo neuronal dinámico con 4 neuronas en la capa oculta y distribución de datos 50-25-25 para el proceso de entrenamiento, validación y prueba, obtuvo el mejor desempeño estadístico, con un error absoluto medio (MAE) de 0.106 centavos de dólar en el periodo analizado, para la simulación del precio diario del café suave colombianos en el mercado americano (Figura 4).

El comportamiento descrito por el modelo ARIMAX (1,1,1) de la serie histórica del precio diario del café suave colombiano en el mercado americano es aceptable, sin embargo, la trayectoria que describen los modelos neuronales es superior, teniendo en cuenta los estadísticos de bondad de ajuste elegidos para determinar el desempeño del modelo.

Resultados similares también lo obtuvieron Pektaş y Cigizoglu (2013) en el cual, la red neuronal presentó mejores predicciones que el modelo ARIMAX en la estimación del coeficiente de escorrentía, sin embargo, el modelo híbrido supero el desempeño de las redes neuronales y el modelo ARIMAX empleado.

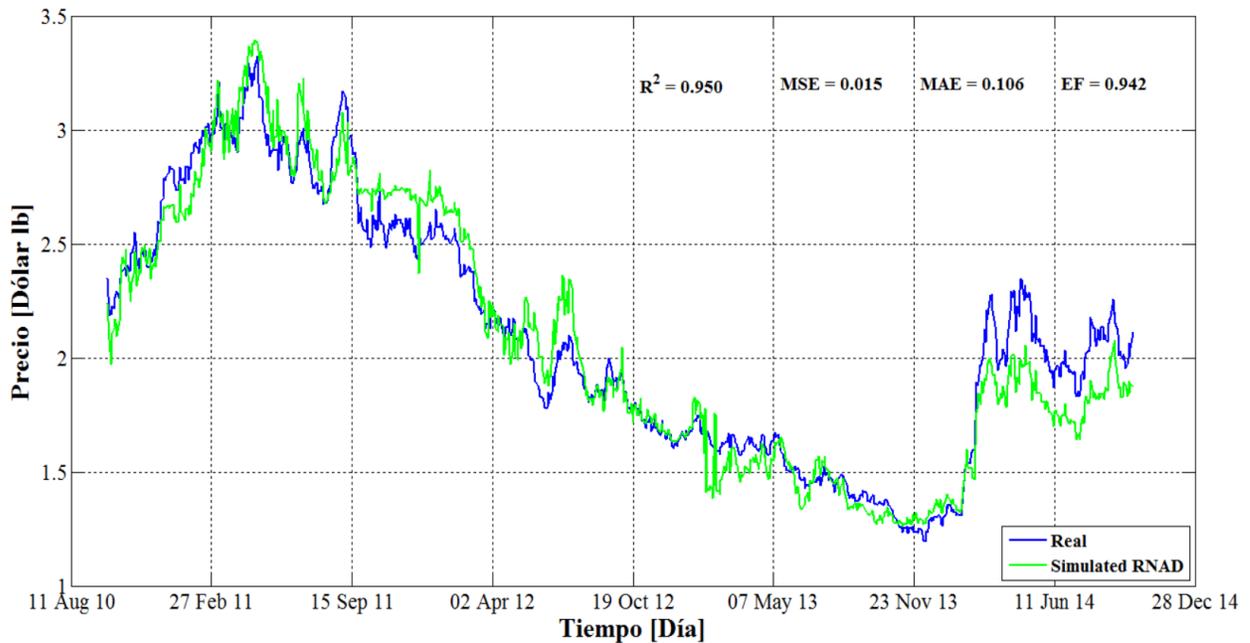


Figura 4. Simulación del precio diario del café suave colombiano con red neuronal dinámica

El mejor desempeño estadístico de las redes neuronales artificiales se debe a que las redes neuronales desarrollan o fabrican un modelo que se ajusta a la base de datos, y con el modelo ARIMAX (1,1,1) basado en la metodología de Box-Jenkins (1976) se intenta ajustar la base de datos a un modelo (García, 2003).

Los resultados alcanzados en este estudio son aceptables desde el punto de vista de la simulación, debido a la inclusión de variables explicativas del precio diario del café suave colombianos, tales como, las condiciones climáticas de la zona cafetera en Brasil y Colombia (García, 2003; Vázquez y Aldana 2007).

La varianza obtenida con los modelos empleados respecto a los valores observados fue 0.0157 para la red neuronal estática (RNAE), 0.0175 para la red neuronal dinámica (RNAD) y 0.0545 para el modelo ARIMAX (1,1,1). Empleando la varianza del error de los modelos, se determina que la relación entre la red neuronal estática (RNAE) y el modelo ARIMAX (1,1,1) es 0.287 $((S_{RNAE})^2 / (S_{ARIMAX(1,1,1)})^2)$ lo cual significa, que el modelo RNAE reduce la varianza del error del modelo ARIMAX (1,1,1) en, 71.3% aproximadamente. Asimismo, La relación de varianzas entre los modelos RNAE y RNAD es 0.896, por lo tanto, el modelo RNAE reduce la varianza del error del modelo RNAD en 10.4%. “En general se considera que dicha relación debe ser menor al 0.9 para que existan diferencias entre el empleo del modelo” (García, 2003).

La simulación del precio diario del café suave colombianos en el mercado americano entre la cosecha cafetera 2010 al 2014, describieron con precisión mayor los modelos neuronales, en comparación con el modelo autorregresivo integrado de promedio móvil con variables explicativas (ARIMAX), ya que, lograron desempeño estadístico mejor. Sin embargo, la red neuronal estática alcanzó el error absoluto medio (MAE) menor y minimizó la varianza de los errores.

CONCLUSIONES

La metodología de redes neuronales artificiales (RNA) es más versátil que la de modelos autorregresivos integrados de promedios móviles (ARIMAX), ya que, emplea más variables de entrada sin la necesidad de volverlas estacionarias.

Aunque el resultado estadístico de las redes neuronales fue superior al obtenido por el modelo ARIMAX (1,1,1) no se debería descartarse éste, debido a que, se podrían emplear estas dos metodologías para formar un modelo híbrido (RNA-ARIMA) que describa con mayor exactitud

el comportamiento del precio diario del café suave colombiano y de esta forma se obtengan mejores resultados.

AGRADECIMIENTOS

A la Organización Internacional del café (ICO), al Instituto Nacional de Meteorología de Brasil (INMET) y al Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE), por haber suministrado información valiosa para la culminación del presente estudio.

LITERATURA CITADA

AGROCLIMA (2015). Plataforma Agroclimática Cafetera. Datos Históricos. [Fecha de consulta: 10 de marzo de 2015]. Disponible en: <http://agroclima.cenicafe.org/datos-historicos>

Box, G. E. P and Jenkins, G. M. (1976). Time Series Analysis: Forecasting and Control. Time Series and Digital Processing. 575p

Brandt, P. T. (2007). Multiple time series models (No. 148). Sage Publications. 99p.

De Felice, M., A. Alessandri, and P. M. Ruti, (2013). Electricity demand forecasting over Italy: Potential benefits using numerical weather prediction models. Electric Power Systems Research, 104: 71-79.

García, I. M. (2003). Análisis Y Predicción De La Serie De Tiempo Del Precio Externo Del Café Colombiano Utilizando Redes Neuronales Artificiales. Universitas Scientiarum, 8, 45-50.

Govindaraju, R. S. (2000). Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. Journal of Hydrologic Engineering, 5(2), 115-123.

Haykin, S. (1994). *Neural networks: a comprehensive foundation*. Prentice Hall PTR. 842 p.

Hu, J. W. S., Hu, Y. C., and Lin, R. R. W. (2012). Applying neural networks to prices prediction of crude oil futures. *Mathematical Problems in Engineering*.

ICO (2016a). International Coffee Organization. Datos estadísticos. Desaparición (consumo). [Fecha de consulta: 16 de enero de 2016]. Disponible en: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/4b-disappearance.pdf>

ICO (2016b). International Coffee Organization. Datos estadísticos. Importaciones (consumo). [Fecha de consulta: 16 de enero de 2016]. Disponible en: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/2b-imports.pdf>

INMET (2015). Instituto Nacional de Meteorología. Datos Históricos. Banco de Datos Meteorológicos para Ensino o Pesquisa. [Fecha de consulta: 2 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>

Kordon, A. K. (2014). Applying Genetic Programming in Business Forecasting. In *Genetic Programming Theory and Practice XI* (pp. 101-117). Springer New York.

Love, R. (1999). Coffee crunch. *Review of African Political Economy*. Published online: 24 Feb 2007. 26:82, 503-508

Maggina, A. (2015). Market-Based Accounting Research (MBAR) Models: A Test of ARIMAX Modeling. In *Handbook of Financial Econometrics and Statistics* (pp. 279-298). Springer New York.

Masters, T. (1993). Practical neural network recipes in C++. Morgan KaufmRNA. 490p.

Meena, B. L., and J. D. Agrawal. 2015. Tidal Level Forecasting Using ANN. *Procedia Eng.* 116: 607-614.

Montgomery, D. C., Jennings, C. L., and Kulahci, M. (2011). Introduction to time series analysis and forecasting (Vol. 526). John Wiley & Sons. 441 p.

Pankratz, A. (2009). Forecasting with univariate Box-Jenkins models: Concepts and cases (Vol. 224). John Wiley & Sons. 562p

Pektaş, A. O., and Cigizoglu, H. K. (2013). ANN hybrid model versus ARIMA and ARIMAX models of runoff coefficient. *Journal of hydrology*, 500, 21-36.

Pelupessy, W. (2007). The World behind the World Coffee Market. *Études rurales*, 189-211.

Pino, D. R., and Parreño, F. J. (2005). Forecasting the Price of Energy in Spain's Electricity Production Market. In *IX Congreso de Ingeniería de Organización* (p. 232).

Salim, A. M., G. S. Dwarakish, K. V. Liju, J. Thomas, G. Devi, and R. Rajeesh. (2015). Weekly Prediction of Tides Using Neural Networks. *Procedia Eng.* 116: 678-682.

Sundermeyer, M., Oparin, I., Gauvain, J. L., Freiberg, B., Schluter, R., and Ney, H. (2013). Comparison of feedforward and recurrent neural network language models. In *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE International Conference on* (pp. 8430-8434). IEEE.

Velásquez Henao, J. D., and Aldana Dumar, M. A. (2007). Modelado del precio del café colombiano en la bolsa de Nueva York usando redes neuronales artificiales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 60(2), 4129-4144.

Vesely, A. (2011). Economic classification and regression problems and neural networks. *Agricultural Economics (Zemědělská Ekonomika)*, 57(3), 150-157.

Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., and Brun, F. (2013). Working with Dynamic Crop Models: Methods, Tools and Examples for Agriculture and Environment. Academic Press. 487 p.

Yildirim, I., Ozsahin, S., and Akyuz, K. C. (2011). Prediction of the Financial Return of the Paper Sector with Artificial Neural Networks. *BioResources*, 6(4).