



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

**ESTUDIO DEL EFECTO DE FACTORES EXTERNOS SOBRE LA
RESPIRACIÓN EN FRUTOS DE AGUACATE (*Persea americana*) MEDIANTE
MODELOS ARIMAX**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

Presenta:

ANABEL MORALES SOLIS

Bajo la supervisión de: ARTEMIO PÉREZ LÓPEZ, DR



Chapingo, Estado de México, agosto de 2022

**ESTUDIO DEL EFECTO DE FACTORES EXTERNOS SOBRE LA
RESPIRACIÓN EN FRUTOS DE AGUACATE (*Persea americana*) MEDIANTE
MODELOS ARIMAX**

Tesis realizada por **Anabel Morales Solis** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
AGROALIMENTARIA**

DIRECTOR:


DR. ARTEMIO PÉREZ LÓPEZ

ASESOR:


DR. TEODORO ESPINOSA SOLARES

ASESOR:


DR. IRÁN ALIA TEJACAL

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
ABREVIATURAS	viii
DEDICATORIA	ix
AGRADECIMIENTOS	x
RESUMEN GENERAL	xii
GENERAL ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	14
2. REVISIÓN DE LITERATURA	19
2.1. Generalidades del aguacate 'Hass'	19
2.2. Fisiología poscosecha del aguacate	19
2.3. Medición de la actividad respiratoria	22
2.3.1. Método estático	22
2.3.2. Método dinámico	22
2.4. Factores que afectan la velocidad de respiración	23
2.4.1. Temperatura	23
2.4.2. Humedad relativa	24
2.4.3. Iluminación	26
2.5. Proceso estocástico	28
2.6. Series de tiempo	30
2.6.1. Serie estacionaria y no estacionaria	31
2.6.2. Ruido blanco	31

2.7.	Modelo ARIMA.....	32
2.7.1.	Metodología de Box-Jenkins	33
2.8.	Modelo ARIMAX	34
2.9.	Causalidad de Granger	35
2.10.	Literatura citada.....	36
3.	MODELADO DE LA VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN EN FRUTOS DE AGUACATE 'HASS' MEDIANTE MODELOS ARIMAX.....	49
3.1.	Introducción	49
3.2.	Materiales y métodos.....	51
3.2.1.	Material experimental	51
3.2.2.	Medición de actividad respiratoria y variables exógenas	52
3.2.3.	Medición de variables de calidad	53
3.2.3.1.	Pérdida de peso.....	53
3.2.3.2.	Firmeza.....	53
3.2.3.3.	Color	54
3.2.3.4.	Acidez titulable.....	54
3.2.3.5.	Sólidos solubles totales.....	54
3.2.4.	Análisis estadístico descriptivo.....	55
3.2.5.	Modelado ARIMA	55
3.2.6.	Modelado ARIMAX.....	56
3.2.7.	Análisis estadístico.....	57
3.3.	Resultados y discusión	57
3.3.1.	Velocidad de respiración	57

3.3.2.	Análisis preliminar de las series de tiempo	57
3.3.3.	Modelado ARIMA	60
3.3.4.	Evaluación de residuales	62
3.3.5.	Ajuste de los modelos	63
3.3.6.	Causalidad	66
3.3.7.	Modelado ARIMAX.....	67
3.3.8.	Ganancia de la función de transferencia	69
3.3.9.	Variables de calidad	70
3.4.	Conclusiones	76
3.5.	Agradecimientos	77
3.6.	Literatura citada	78

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros estadísticos de las series de tiempo de entrada y salida.	58
Cuadro 2. Estimadores de los modelos ARIMA ajustados para las series de tiempo de entrada y la serie de tiempo de salida.	60
Cuadro 3. Modelos ARIMA de las series de tiempo de entrada y la serie de tiempo de salida.	62
Cuadro 4. Prueba de causalidad de Granger.	67
Cuadro 5. Estimadores de los parámetros de los modelos ARIMAX (1,1,3) de la serie de tiempo de salida y la serie de tiempo de entrada.	68
Cuadro 6. Modelos ARIMAX (1,1,3) del efecto univariado y multivariado de las series de salida sobre la serie de entrada en frutos de aguacate 'Hass'.	69
Cuadro 7. Ganancia de los modelos de función de transferencia de la velocidad de respiración en frutos de aguacate 'Hass'.	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento respiratorio de productos climatéricos y no climatéricos en relación con su velocidad de respiración.	21
Figura 2. Diagrama del sistema de medición de actividad respiratoria con flujo continuo.	53
Figura 3. Serie original de la velocidad de respiración de los frutos de aguacate 'Hass'.	59
Figura 4. Serie en logaritmo y con primera diferencia de la velocidad de respiración de los frutos de aguacate 'Hass'.	59
Figura 5. Diagnóstico de correlación de residuales de la serie transformada (a) y del modelo ARIMA (1,1,3) (b) para la velocidad de respiración en frutos de aguacate 'Hass'.	63
Figura 6. Ajuste del modelo ARIMA de la serie de salida RR.	64
Figura 7. Ajuste del modelo ARIMA de la serie de entrada TEMP.	64
Figura 8. Ajuste del modelo ARIMA de la serie de entrada HR.	65
Figura 9. Ajuste del modelo ARIMA de la serie de entrada LUM.	65
Figura 10. Función de correlación cruzada de a) velocidad de velocidad de respiración vs temperatura, b) velocidad de velocidad de respiración vs humedad relativa y c) velocidad de respiración vs iluminación.	66
Figura 11. Pérdida de peso de los frutos de aguacate 'Hass'.	72
Figura 12. Firmeza de los frutos de aguacate 'Hass'.	72
Figura 13. Variables de color, a) Iluminación, b) ángulo de tono (Hue) y c) pureza (croma) de los frutos de aguacate 'Hass'.	73
Figura 14. Sólidos solubles totales los frutos de aguacate 'Hass'.	74
Figura 15. Acidez titulable los frutos de aguacate 'Hass'.	75

ABREVIATURAS

AR: Componente Autorregresivo

MA: Componente de Media móvil

I: Elemento diferenciador

p: Denotación de proceso autorregresivo

d: Elemento diferenciador

q: Denotación de proceso de media móvil

ARIMA: Modelo autorregresivo integrado de media móvil

ARIMAX: Modelo autorregresivo integrado de media móvil con variables exógenas

ACF: Función de autocorrelación

PACF: Función de autocorrelación parcial

CCF: Función de correlación cruzada

AIC: Criterio de Información de Akaike

BIC: Criterio de información Bayesiano

ADF: Prueba de Dickey-Fuller aumentada

HR: Humedad relativa

T: Temperatura

LUM: Iluminación

DEDICATORIA

A mis padres y hermanas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), a través de la beca No. 774775 otorgada para la realización de mis estudios de Maestría en Ciencia Agroalimentaria.

A la Universidad Autónoma Chapingo por ofrecerme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

A la comunidad del Departamento de Ingeniería Agroindustrial por el apoyo incondicional y su trato generoso y amable durante mi estancia como estudiante.

Al Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria y a la línea de Bioprocesos Agroalimentarios por otorgarme las herramientas necesarias para llevar a cabo el proyecto de investigación propuesto.

A la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP) por el financiamiento otorgado por medio del proyecto convencional 21022-C-62.

Al Dr. Artemio Pérez López por su calidez, su paciencia y por la oportunidad de trabajar bajo su dirección durante la realización de este trabajo de investigación.

Al Dr. Teodoro Espinosa Solares por la confianza para trabajar de manera conjunta.

Al Dr. Irán Alia Tejacal por sus valiosos aportes al trabajo de investigación.

A la Dra. Marta Elva Ramírez Guzmán por aportar sus conocimientos en cuestiones de modelado de series de tiempo.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Anabel Morales Solis

Fecha de nacimiento: 21 de octubre de 1996

Lugar de nacimiento: San Juan Tabaá, Oaxaca

CURP: MOSA961021MOCRLN04

Profesión: Ingeniero Agroindustrial

Cédula profesional: 12302130

Desarrollo académico

Preparatoria: Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario, No.109

Licenciatura: Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

La velocidad de respiración en frutos frescos es un proceso metabólico complejo donde intervienen factores externos que limitan su vida útil después de la cosecha. Se ha estudiado ampliamente este fenómeno con modelado de tipo determinista, sin embargo, existen otros eventos aleatorios que pueden modificar su comportamiento y que no son considerados en este tipo de modelos. Alternativamente, los modelos de tipo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) con variables exógenas (ARIMAX) son capaces de trabajar con este tipo de variables también conocidas como estocásticas. Bajo esta premisa se planteó como objetivo dilucidar el efecto de la temperatura, la humedad relativa y la iluminación sobre la velocidad de respiración de frutos de aguacate 'Hass'. Los valores de las variables se registraron de manera continua, en lapsos de tiempo uniformes, hasta la maduración del fruto para construir las series de tiempo. Estas series de tiempo fueron sometidas a la metodología de Box-Jenkins para la construcción de los modelos ARIMA, en donde la velocidad de respiración temperatura, humedad relativa e iluminación tuvieron el mejor ajuste con los modelos ARIMA (1,1,3), (3,1,2), (1,1,2) y (1,1,2), respectivamente. El preblanqueado de la velocidad de respiración con las variables exógenas permitió obtener el modelo ARIMAX (1,1,3). El impacto detectado en las funciones de transferencia indica incrementos en la velocidad de respiración de 1.96 %, 6.37 % y 3.79 %, a partir del valor promedio por cada unidad de incremento en la temperatura, humedad relativa e iluminación, respectivamente. Por lo tanto, el modelado ARIMAX es confiable para explicar la respuesta respiratoria de los frutos de aguacate 'Hass' por el efecto de factores externos después de la cosecha.

Palabras clave: *Persea americana*, series de tiempo, modelado estocástico, variables exógenas, ARIMAX.

Tesis de Maestría en Ciencias, Maestría en Ciencia y Tecnología
Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Anabel Morales Solís

Director de Tesis: Artemio Pérez López, Dr.

GENERAL ABSTRACT

The respiration rate in fresh fruits is a complex metabolic process where external factors intervene that limit its useful life after harvest. This phenomenon has been extensively studied with deterministic modeling; however, other random events can modify its behavior and that is not considered in this type of model. Alternatively, autoregressive integrated moving average models (ARIMA) with exogenous variables (ARIMAX) are capable of working with this type of variable, also known as stochastic. Under this premise, the objective was to elucidate the effect of temperature, relative humidity, and illumination on the respiration rate of 'Hass' avocado fruits. The values of the variables were recorded continuously, in uniform periods, until the ripening of the fruit to build the time series. These time series were subjected to the Box-Jenkins methodology for the construction of the ARIMA models, where the respiration rate, temperature, relative humidity, and illumination had the best fit with the ARIMA models (1,1,3), (3,1,2), (1,1,2) and (1,1,2), respectively. The pre-bleaching of the respiration rate with the exogenous variables allowed us to obtain the ARIMAX model (1,1,3). The impact detected in the transfer functions indicates increases in the respiration rate of 1.96%, 6.37%, and 3.79%, from the average value for each unit of increase in temperature, relative humidity, and illumination, respectively. Therefore, ARIMAX modeling is reliable to explain the respiratory response of 'Hass' avocado fruits due to the effect of external factors after harvest.

Key words: *Persea americana*, time series, stochastic modeling, exogenous variables, ARIMAX

Thesis: Universidad Autónoma Chapingo

Author: Anabel Morales Solis

Advisor: Artemio Pérez López, Dr.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El aguacate 'Hass' (*Persea americana*) es un fruto con alto valor nutricional (Salazar-López *et al.*, 2020; Yahia y Woolf, 2011), sin embargo, es susceptible a daños debido a factores internos (fruto) y externos (ambiente) (Pérez-López *et al.*, 2014; Wills y Golding, 2016) que tienen una influencia directa sobre la vida poscosecha de los productos hortofrutícolas acelerando su proceso de maduración y provocando pérdidas significativas (Yahia, 2019). Los frutos de aguacate continúan su proceso de maduración después del corte, en donde el metabolismo respiratorio es el principal mecanismo de regulación mediante la descomposición oxidativa de moléculas de sustratos como almidón, azúcares y ácidos orgánicos en moléculas más simples como CO₂ y H₂O y liberación de oxígeno (Caleb *et al.*, 2013; Jalali *et al.*, 2020). Los cambios físicos más notorios en el fruto durante este proceso, y que conducen posteriormente a la senescencia, son la pérdida de peso fresco, pérdida de firmeza y de la calidad visual del tejido comestible en postcosecha (Jalali *et al.*, 2020). La temperatura es un factor que afecta fuertemente el metabolismo de las frutas y hortalizas por lo que su estudio en poscosecha adquiere relevancia (Amodio *et al.*, 2015), ya que las reacciones de envejecimiento, oxidativas y enzimáticas involucradas en la respiración y el crecimiento microbiano dependen principalmente de este factor (Waghmare *et al.*, 2013). La humedad relativa también juega un papel importante en el almacenamiento de la fruta, cuando es excesivamente alta, proporciona condiciones para el desarrollo de enfermedades fúngicas y trastornos fisiológicos, y cuando es demasiado baja provoca una gran pérdida de masa (agua) y marchitez (Anese *et al.*, 2016). El efecto de la luz es otro factor ambiental que se ha estudiado para conocer el metabolismo de tejidos vegetales comestibles después de la cosecha, con el objetivo de preservar la calidad durante almacenamiento (Costa *et al.*, 2013; Özdemir, 2016).

Para describir con precisión estas dinámicas, es necesario considerar las condiciones del sistema tales como la temperatura, la concentración externa de los gases involucrados y la humedad relativa del entorno (Castellanos y Herrera, 2017). Una forma de evaluar la magnitud del impacto de los factores externos de manera individual o conjunta sobre la velocidad de respiración es por medio de modelos de probabilidad o también llamados estocásticos. Los modelos estocásticos derivados de las series de tiempo se basan en el supuesto de estacionariedad de la serie, la cual asume que el proceso se mantiene en equilibrio estadístico con propiedades probabilísticas que no cambian a través del tiempo (Box *et al.*, 2016). Los modelos estocásticos de mayor aplicación son los modelos Autorregresivo Integrado de Medias Móviles (ARIMA), que basan su construcción en la metodología establecida por Box-Jenkins (Fernandes de Souza *et al.*, 2022). Los modelos ARIMA son bastante efectivos, debido a que pueden representar una serie de tiempo como componente Autorregresivo puro (AR), Media Móvil puro (MA) o Autorregresivo de Medias Móviles combinado (ARMA) (Khandelwal *et al.*, 2015). Para la construcción de este tipo de modelos se emplean un conjunto de datos conocidos como serie de tiempo, cuya característica es el orden cronológico y el espaciado uniforme entre sus datos durante el tiempo. La ventaja de usar este procedimiento de modelado es que se puede trabajar con fenómenos complejos en donde está presente un componente estocástico en la serie con la posibilidad de incorporar a éste el efecto de uno o más variables externas mediante correlación cruzada para obtener la ganancia o efecto de las variables externas. El comportamiento estocástico de las variables velocidad de respiración de un fruto y de los factores ambientales que lo afectan, permiten modelar su comportamiento conjunto mediante modelado estocástico. Con base en lo anterior, se planteó como objetivo dilucidar el efecto de factores externos sobre la velocidad de respiración de frutos de aguacate en régimen transitorio mediante el empleo de herramientas de modelado estocástico.

Literatura citada

- Fernandes de Souza, J. A., Mendonça-Silva, M., Guilherme-Rodrigues, S., & Machado-Santos, S. (2022). A forecasting model based on ARIMA and artificial neural networks for end-OF-life vehicles. *Journal of Environmental Management*, 318, 115616. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115616.
- Amodio, M. L., Derossi, A., Mastrandrea, L., & Colelli, G. (2015). A study of the estimated shelf life of fresh rocket using a non-linear model. *Journal of Food Engineering*, 150, 19–28. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.10.030.
- Anese, R., de O., Brackmann, A., Thewes, F. R., Schultz, E. E., & De Gasperin, A. R. (2016). Mass loss by low relative humidity increases gas diffusion rates in apple flesh and allows the use of high CO₂ partial pressures during ultralow O₂ storage. *Scientia Horticulturae* 198, 414–423. doi: 10.1016/j.scienta.2015.12.015.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2016). Time Series Analysis: Forecasting and Control (5th ed.) . New Jersey: Wiley and Sons Inc. Hoboken
- Caleb, O. J., Mahajan, P. V., Al-Said, F. A., & Opara, U. L. (2013). Transpiration rate and quality of pomegranate arils as affected by storage conditions. *CyTA - Journal of Food*, 11, 199-207. doi: 10.1080/19476337.2012.721807.
- Castellanos, D. A., & Herrera, A. O. (2017). Modified atmosphere packaging: Design and optimization strategies for fresh produce. In I. Kahramanoglu (Ed.), *Postharvest handling* (pp. 85-106). doi: 10.5772/intechopen.68498.
- Costa, L., Millan Montanoa Y., Carrióna C., Rolnya N., & Guiameta J. J. (2013). Application of low intensity light pulses to delay postharvest senescence of *Ocimum basilicum* leaves. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 181–191. doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.06.017.

- Jalali, A., Linke, M., Geyer, M., & Mahajan, P. V. (2020). Shelf life prediction model for strawberry based on respiration and transpiration processes. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100525. doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100525.
- Khandelwal, I., Adhikari, R., & Verma, G. (2015). Time series forecasting using hybrid ARIMA and ANN models based on DWT decomposition. *Procedia Computer Science*, 48 (1), 173–179. doi: 10.1016/j.procs.2015.04.167.
- Özdemir, İ. Z. (2016). Effect of light treatment on the ripening of banana fruit during postharvest handling. *Fruits*, 71 (2), 115-122. doi: 10.1051/fruits/2015052.
- Pérez-López, A., Chávez-Franco, S. H., Villaseñor-Perea, C. A., Espinosa-Solares, T., Hernández-Gómez, L. H., & Lobato-Calleros, C. (2014). Respiration rate and mechanical properties of peach fruit during storage at three maturity stages. *Journal of Food Engineering*, 142, 111-117. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.06.007.
- Salazar-López, N. J., Domínguez-Avila, J. A., Yahia, E. M., Belmonte-Herrera, B. H., Wall-Medrano, A., Montalvo-González, E., & González-Aguilar, G. A. (2020). Avocado fruit and by-products as potential sources of bioactive compounds. *Food Research International*, 138 (Part A), 109774. doi: 10.1016/j.foodres.2020.109774.
- Waghmare, R., Mahajan, P., & Annapure, U. (2013). Modelling the effect of time and temperature on respiration rate of selected fresh-cut produce. *Postharvest Biology and Technology*, 80, 25–30. doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.01.012.
- Wills, R. B. H., & Golding, J. B. (2016). Postharvest: an introduction to the physiology and handling of fruit and vegetables (6th Ed.). *Journal of Nutrition and Food Sciences*. Australia and New Zealand: UNSW Press.

Yahia, E. M., & Woolf, A. B. (2011). Avocado (*Persea americana* Mill.). *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits*, 2, 125–185. doi: 10.1533/9780857092762.125.

Yahia, E. M. (2019). *Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities*. Elsevier-Woodhead Publishing.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades del aguacate 'Hass'

El aguacate 'Hass' es un fruto que se caracteriza por tener una piel rugosa y forma oval, entre 180-280 g de peso, entre 22-23 % de aceite y arriba de 23 % de materia seca cuando alcanza su madurez fisiológica (Magwaza y Tesfay, 2015; Rodríguez-Fonseca *et al.*, 2019). La relación cáscara: semilla: pulpa es de 8.5: 11.5: 72 % (Bernal y Díaz, 2020). La pulpa de color amarillo tiene un gran sabor a nuez y avellana, con textura suave-cremosa cuando madura y una semilla de pequeña a mediana (Loza-Hernández, 2015; Zapata *et al.*, 2014). Está catalogado como la cuarta fruta más importante del mundo por sus buenas características organolépticas y su alto valor nutricional (Bautista-Baños *et al.*, 2020). Los principales constituyentes de la fruta de aguacate son agua (70-80 %), grasa (15-18 %), hidratos de carbono (4-5 %), proteína (1-2 %), fibra (1 %) y ceniza (1 %) (Donetti, 2012). Se utiliza como fuente de alimentación de alto valor energético debido al contenido en lípidos de la pulpa, de los cuales aproximadamente el 72 % son ácidos grasos monoinsaturados, como los ácidos oleico, eicosenoico y palmitoleico, el 15 % son ácidos grasos saturados, es decir, ácidos palmítico, mirístico y esteárico, y el último 13 % son ácidos grasos poliinsaturados (ácido linoleico), los cuales varían dependiendo del cultivar, la región anatómica del fruto y de la localización geográfica del crecimiento de la planta (Araújo *et al.*, 2018). El fruto posee también una abundancia de compuestos fenólicos con alta capacidad antioxidante como los ácidos fenólicos, flavonoides, lignanos, vitaminas, entre otros (Tremocoldi *et al.*, 2018; Villa-Rodríguez *et al.*, 2020).

2.2. Fisiología poscosecha del aguacate

La respiración es el proceso fundamental de conversión de energía de los seres vivos en donde se genera la mayor parte del ATP necesario para el mantenimiento y el crecimiento de las células a través de la fosforilación oxidativa e impulsada por la oxidación de ácidos orgánicos, liberando dióxido de carbono

(CO₂) y reduciendo el oxígeno (O₂) a agua (Millar *et al.*, 2011). Mientras los frutos permanecen adheridos al árbol, las pérdidas provocadas por los procesos de respiración y transpiración son compensadas a través de la savia que contiene agua, productos fotosintetizados (especialmente sacarosa y aminoácidos) y minerales (Wills *et al.*, 2007). Una vez recolectados, el agua y los nutrientes suministrados por la planta se interrumpen, pero la respiración y otras reacciones metabólicas continúan (Montero-Calderón y Cerdas-Araya, 2012).

La respiración es un proceso que genera un incremento de azúcares, reducción de acidez, cambio de color, etc. (Wills y Golding, 2016) y permite definir si pertenecen a frutos climatéricos o no climatéricos (Guadarrama y Peña, 2013). Generalmente, los frutos se clasifican de acuerdo con su comportamiento respiratorio. En frutos no climatéricos, la velocidad de respiración disminuye lentamente después de la cosecha como consecuencia del agotamiento de los sustratos disponibles para la respiración, por lo que no registran un incremento en su velocidad de respiración. Por el contrario, las frutas climatéricas exhiben un aumento respiratorio rápido y dramático en la velocidad de respiración, acompañado de una producción autocatalítica de etileno (Montero-Calderón, y Cerdas-Araya, 2012; Toivonen, 2016). El comportamiento del fruto se desarrolla en tres etapas que son el crecimiento, el desarrollo y la maduración (Martínez-González *et al.*, 2017). Se pueden distinguir tres etapas en la respiración del aguacate: preclimatérico (respiración mínima), climatérico (respiración máxima) y posclimatérico (disminución de la respiración) (Kassim *et al.*, 2013). La etapa final en el desarrollo de los órganos vegetales es llamada senescencia, que acelera el ablandamiento de la fruta (Crisosto *et al.*, 2020b). Por otro lado, Lallum *et al.* (2004) consideran que el patrón climatérico del comportamiento de maduración en términos de etileno se puede dividir en 4 fases: a) la fase de inhibición que incluye el tiempo posterior a la cosecha cuando la fruta es relativamente insensible al etileno, b) la fase preclimatérica que sigue a la fase de inhibición y en la que la fruta se vuelve sensible al etileno pero no produce etileno, c) la fase climatérica que incluye el aumento en la producción de etileno y c) la fase posclimatérica que incluye el período posterior al pico climatérico. El

aguacate siendo un fruto que presenta una velocidad de respiración muy alta (mayor a 60 mg de CO₂) (Kader, 2011), después de cosechado es considerado un fruto climatérico.

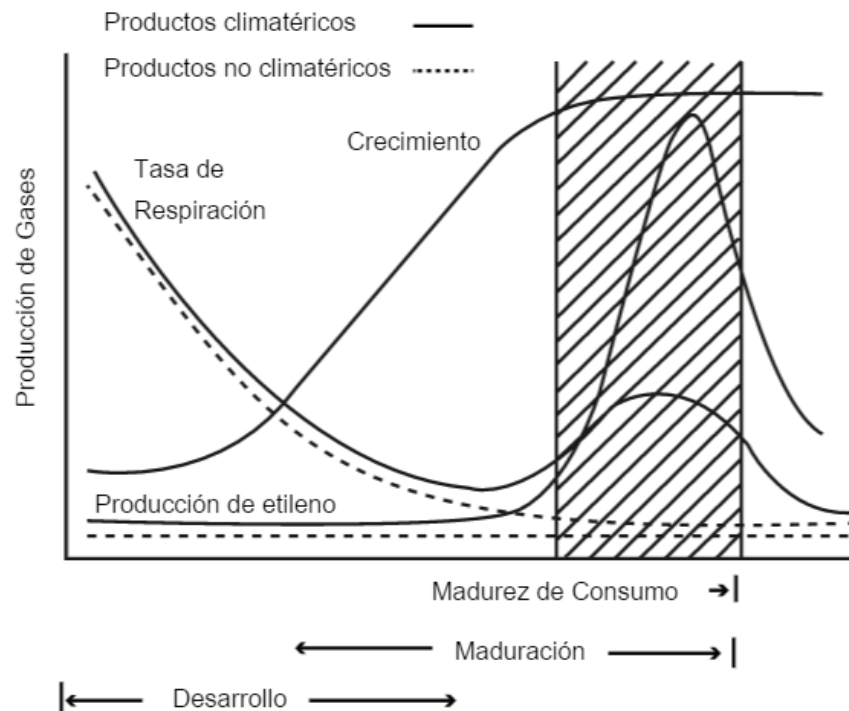


Figura 1. Comportamiento respiratorio de productos climatéricos y no climatéricos en relación con su velocidad de respiración (Zapata *et al.*, 2014).

Existe una relación directa entre la producción de etileno y la velocidad de respiración. El etileno es un compuesto con la función de controlar la velocidad de maduración y la mayoría de los eventos de maduración en frutos climatéricos (Bouzayen *et al.*, 2010). El aguacate ‘Hass’ no produce etileno mientras está adherido al árbol por lo que no madura en esta condición (HersHKovitz *et al.*, 2009) pero presenta un aumento al inicio de la maduración (Dorantes-Álvarez *et al.*, 2012). Los cambios producidos en la maduración del fruto no se pueden detener, sin embargo, pueden disminuirse dentro de ciertos límites (Kader, 2011). Mientras mayor es la cantidad de etileno que se produce, mayor será la velocidad de respiración y viceversa (Zapata *et al.*, 2014). Los niveles de producción de

etileno comienzan después de la cosecha y estos niveles aumentan considerablemente con la maduración a más de $100 \mu\text{L C}_2\text{H}_4 \text{ kg}^{-1}\text{h}^{-1}$ a 20°C (68°F) (Kader y Arpaia, 2012).

2.3. Medición de la actividad respiratoria

La actividad respiratoria de los frutos se puede cuantificar mediante la medición de la velocidad de emisión de CO_2 o de consumo de O_2 . Existen dos métodos para la cuantificación de la actividad respiratoria de los frutos, clasificándose en estático y dinámico o de flujo continuo, los cuales se describen a continuación:

2.3.1. Método estático

El tejido o fruto se coloca en un recipiente hermético cerrado y se realiza la medición de la acumulación de CO_2 o del agotamiento de O_2 en la atmósfera del fruto de manera periódica. Es posible emplear este método durante periodos breves de tiempo, incluso con porciones muy pequeñas de tejido, pero tiene la desventaja de ser un sistema sin equilibrio, es decir, el agotamiento de O_2 y la acumulación de CO_2 u otros gases (especialmente C_2H_4) pueden afectar su velocidad de respiración después de 1-2 h con concentraciones del 0.2 % en el interior del recipiente (Saltveit, 2016).

2.3.2. Método dinámico

El tejido o fruto se coloca también en un recipiente hermético cerrado a través del cual se hace fluir una corriente de gas que debe mantenerse constante. Se toman las muestras después de cierto periodo de tiempo que generalmente es cuando el sistema alcanza un equilibrio, es decir, las diferencias de concentración entre los gases de entrada y salida serán iguales a la producción de CO_2 o consumo de O_2 . Este sistema de flujo continuo es muy adecuado para experimentos a largo plazo y teniendo como ventaja que las concentraciones fisiológicas activas de los gases desprendidos puedan mantenerse por debajo de sus niveles críticos. Para

calcular la velocidad de respiración es necesario conocer el peso del tejido, la concentración de CO₂ de entrada, el flujo de gas y concentración de dióxido de carbono de salida (Saltveit, 2016).

Con la finalidad de medir la emisión de gases de respiración de manera continua en el tiempo se han hecho modificaciones al método dinámico. Pérez-López *et al.* (2014) desarrollaron un prototipo para medir esta variable que consiste en un sistema que maneja un flujo de aire proveniente de un compresor, un tablero mezclador de gases equipado con un conjunto de válvulas y una columna barostática para el control de la presión del flujo de aire, un recipiente hermético con dos orificios para el flujo continuo de aire dentro del recipiente, sensores para determinar el CO₂ y un sistema de adquisición de datos. Por otro lado, Cartagena *et al.* (2020) construyeron un equipo de medición continua, por lo cual utilizaron sensores de medición de CO₂, una bomba de aire, una trampa de agua de vidrio, filtro hidrofóbico, filtro de partículas, una cámara de respiración de vidrio para el intercambio gaseoso y conductos de látex empleando el software Gaslab® para la adquisición de datos.

2.4. Factores que afectan la velocidad de respiración

2.4.1. Temperatura

La temperatura es el factor más importante que influye en el deterioro de los productos frescos (Yahia, 2019). La baja temperatura ralentiza la pérdida de agua y energía de los vegetales y reduce el crecimiento de la pudrición (Ekman *et al.*, 2016), siendo una práctica fundamental y la forma más sencilla de retrasar el deterioro vegetal (Medina *et al.*, 2012). El manejo de la temperatura del fruto del aguacate a lo largo de la cadena de suministro es el factor más importante que afecta la calidad física, sensorial y química del fruto (Bill *et al.*, 2014; Kassim *et al.*, 2013). Generalmente, la temperatura tiene una relación directamente proporcional a la velocidad de respiración, es decir, mientras mayor temperatura, mayor velocidad de respiración (Kader, 2011). Temperaturas bajas extienden la vida de anaquel (Li *et al.*, 2016), mientras que temperaturas altas aceleran el

metabolismo y reducen la vida poscosecha de las especies cultivadas, temperaturas más bajas pueden causar daños por frío (Tonetto y Pareek, 2019). Es por ello que para cada fruto existen condiciones de almacenamiento con temperaturas en la que el fruto no presenta alteraciones y depende de la duración de la conservación, de la madurez y del origen de los frutos (Calvo *et al.*, 2018). Las condiciones óptimas cuando se desea tratar productos hortofrutícolas para acelerar la maduración son temperaturas entre 18 y 25 °C hasta por 11 días y de 5 °C para almacenamiento refrigerado por un periodo de hasta 20 días para su conservación (Arpaia *et al.*, 2015; Bernal y Díaz, 2020). En aguacates la temperatura óptima oscila entre 5 °C a 13 °C para aguacates verdes y de 2 °C a 4 °C para aguacates maduros (Dorantes- Álvarez, 2012).

El efecto del cambio de temperatura en la velocidad de reacción se define como el cociente de la velocidad de cambio sobre un cambio de temperatura de 10 °C (es decir, Q_{10}) (Toivonen, 2016). Los valores de Q_{10} son generalmente más altos entre 1 y 10 °C (Wills *et al.*, 2007). Generalmente se utiliza un valor estándar de 2, es decir, la velocidad de una reacción biológica se duplica por cada 10 °C de aumento de temperatura (Wu *et al.*, 2019). Castellanos *et al.* (2017) determinaron la velocidad de respiración en aguacate 'Hass' y feijoa a diversas temperaturas en atmósferas modificadas encontrando que la velocidad de respiración se duplicó al incrementar la temperatura en 14 °C. Por otro lado, Lima *et al.* (2015) evaluaron la respuesta de temperatura sobre la actividad respiratoria en frutos de mangaba (*Hancornia speciosa* Gomes) encontrando que en el rango de temperaturas de entre 10 y 20 °C, la velocidad de respiración aumentó 2.8 veces ($Q_{10}= 2.8$), y entre 20 y 25 °C, el aumento fue de 1.5 veces ($Q_{10}= 1.5$).

2.4.2. Humedad relativa

La humedad relativa es el porcentaje de saturación del aire y se refiere a la cantidad de vapor de agua en el aire en comparación con el máximo que puede contener a esa temperatura. Esto varía según la temperatura, ya que el aire caliente puede contener mucho más vapor de agua que el aire frío, a medida que

desciende la temperatura, el aire es menos capaz de retener el vapor de agua (Ekman *et al.*, 2016). La humedad relativa es un factor que tiene influencia sobre la respiración y la transpiración en productos frescos (Bovi *et al.*, 2018; Zhu, 2022). La transpiración y, en menor grado, la respiración, son dos procesos bien conocidos de pérdida de agua de los productos agrícolas frescos, asociados con la degradación visual y de la textura (Xanthopoulos *et al.*, 2017). La transpiración es una actividad fisiológica básica de las plantas que implica transferencia de masa (agua) y energía entre el producto y la atmósfera circundante, esta transferencia de agua del fruto al exterior es causada por un déficit de presión de vapor del producto con relación a su entorno (Castellanos *et al.*, 2016; Herrera *et al.*, 2013). Por ende, la humedad relativa del ambiente tiene un efecto considerable en la pérdida de agua de los productos frescos durante el almacenamiento debido a que su valor es inversamente proporcional a la transpiración (Wang *et al.*, 2014), es decir, mientras mayor la humedad relativa menor será la transpiración, por el contrario, mientras menor la humedad relativa la transpiración será mayor, aunque la pérdida de agua de los productos cosechados se ve frenada por barreras estructurales (por ejemplo, una cutícula cerosa) y controles fisiológicos (por ejemplo, el cierre estomático), que confieren una importante resistencia a la pérdida de agua en muchos productos (Wills y Golding, 2016).

Una de las maneras de reducir la pérdida de agua es manteniendo una humedad relativa alta constante alrededor del producto (Crisosto *et al.*, 2020a), reduciendo así el efecto del déficit de presión de vapor del agua y por ende la pérdida de humedad (Caleb *et al.*, 2013; Nabi y Ahmad, 2020). Se sugiere que un 90 % de humedad relativa es la condición óptima para el almacenamiento de frutas (Grande-Tovar *et al.*, 2018). Generalmente se recomiendan temperaturas de conservación de 5-6 °C (Bill *et al.*, 2014) y humedades relativas altas (90 %) y para una adecuada maduración se recomiendan condiciones de 20 °C y 90 % de humedad relativa lo que evitará en cierta medida, pérdidas de peso por las deshidrataciones (Rodríguez-Fonseca *et al.*, 2019). Sin embargo, una humedad relativa mayor a 95 % puede aumentar el crecimiento de bacterias y hongos y,

por lo tanto, la degradación patológica (Gómez-Aldapa, 2016; Jafarzadeh *et al.*, 2021). Especialmente si se combina con fluctuaciones de temperatura, aumenta la probabilidad de condensación y el agua libre puede causar rajaduras, grietas, decoloración y pudrición, por lo que equilibrar los riesgos asociados con el agua externa con los de la pérdida de humedad es otro desafío para el profesional de poscosecha (Ekman *et al.*, 2016). Los frutos de aguacate contienen más del 85 % de agua en peso, por lo que es necesaria su conservación con una humedad relativa alta y temperatura baja, retrasando así su senescencia y manteniendo la textura y calidad del fruto (Bernal y Díaz, 2020).

Las frutas y verduras frescas difieren en sus tasas de respiración, temperatura de almacenamiento y humedad relativa que, en consecuencia, afectan los requisitos de envasado y su vida útil (Ayhan, 2019). Investigaciones previas han estudiado el efecto de la humedad relativa y temperatura de manera conjunta sobre la velocidad de respiración en frutos a través del modelado. Ktenioudaki *et al.* (2019) estudiaron el efecto de la humedad relativa (40, 60, 70, 80 y 90 %) sobre los cambios de apariencia (color y arrugamiento) y los cambios en las propiedades químicas de fresa durante almacenadas a 2 °C durante 7 días. Los resultados revelaron que el arrugamiento y la pérdida de peso fueron más intensos para las fresas mantenidas a 40 y 60 % de humedad relativa. Destacaron la importancia de utilizar la humedad relativa en el modelado predictivo al diseñar cadenas de suministro con la finalidad de minimizar las pérdidas poscosecha. Por otro lado, Murmu y Mishra (2016) evaluaron el efecto de diferentes humedades relativas (70, 80 y 90 %) en plátanos, encontrando que la transpiración aumentó con el aumento de la temperatura y disminuyó con el aumento de la humedad relativa de almacenamiento.

2.4.3. Iluminación

La calidad poscosecha de las frutas y verduras se puede mantener durante períodos prolongados mediante el control de factores ambientales como la temperatura, la humedad y la composición de la atmósfera circundante. Sin

embargo, el efecto de la luz como factor ambiental en la calidad de los productos frescos se ha pasado por alto en la investigación sobre la poscosecha hasta hace poco tiempo (Özdemir, 2016). El espectro de luz visible (400-700 nm) tiene influencia sobre el crecimiento de las plantas y afecta el desarrollo, la morfología y el metabolismo fisiológico de las plantas, especialmente la luz azul (400-500 nm) y roja (600-700 nm), de esta manera se regula el crecimiento, la diferenciación y el metabolismo secundario de la planta como fuente de energía principal para la asimilación fotosintética del CO₂ en las plantas (Ilić y Fallik, 2017; Lin *et al.*, 2013). Se ha demostrado que el tratamiento con luz azul puede retrasar eficazmente la descomposición de muchas frutas durante el almacenamiento poscosecha, por ejemplo, se ha estudiado el efecto de la luz azul en pitahaya, demostrando que la descomposición en esta fruta se retrasó significativamente (Wu *et al.*, 2020). Lester *et al.* (2010) descubrieron que la exposición continua a la luz evitaba la pérdida de ácido ascórbico y era beneficiosa para aumentar las cantidades de carotenoides y tocoferoles de las espinacas tiernas (*Spinacia oleracea* L.), por otro lado, Gong *et al.* (2015) encontraron que el tratamiento con luz azul indujo la maduración en durazno. Li *et al.* (2017), estudiaron el efecto de la luz roja y verde en tomate, los resultados obtenidos demostraron que una proporción adecuada de luz roja, azul (roja:azul = 3:1) promueve el crecimiento y la calidad del fruto. Por otro lado, Xie *et al.* (2019), encontraron que la luz azul/roja suplementaria indujo un mayor contenido de licopeno en los frutos de tomate. Liu *et al.* (2009) evaluaron el efecto de la luz roja sobre tomates encontrando que la calidad mejoró dramáticamente con los tratamientos con luz roja y la concentración de b-caroteno no se vio afectada. Sun *et al.*, (2014) evaluaron los efectos de la calidad de la luz y el nivel de irradiación en peras 'Mantianhong' a temperatura óptima para la acumulación de antocianinas, encontrando que el aumento de la luz visible mejoró sinérgicamente el color rojo de la fruta.

Sin embargo, la exposición a la luz también trae consigo efectos perjudiciales en la calidad del producto, un estudio realizado por Sanz *et al.* (2009) demostró que espárragos almacenados bajo luz experimentaron un deterioro acelerado y una

vida útil más corta que los almacenado en oscuridad continua. Özdemir, (2016) estudió el efecto de tratamiento de luz continua en la maduración de la fruta de plátano durante el manejo poscosecha mostrando que la exposición a la luz aceleró la maduración durante la exhibición y venta al por menor. El estudio de almacenamiento en luz visible adquiere relevancia ya que se considera responsable de la disminución del valor nutricional y del sabor al catalizar la oxidación de lípidos, reducir el contenido de vitaminas, suavizar los tejidos y medios de degradación de los pigmentos (Mihaly *et al.*, 2016).

2.5. Proceso estocástico

Un proceso estocástico se describe como una secuencia de números aleatorios en los que el resultado de cada experimento es un número infinito de valores (Theodoridis, 2020). Por lo general, una variable aleatoria (o estocástica) se define como una variable que puede asumir más de un valor debido al azar (experimento aleatorio) (Casas-Sánchez *et al.*, 2010). El conjunto de valores una variable aleatoria se llama "espacio de estado" y, dependiendo de la naturaleza de su espacio de estado, se clasifican en discretas (asumiendo un número finito o contable de valores) o continuas, asumiendo cualquier valor de un continuo de posibilidades (Kovatchev y Patek, 2014). El resultado de lanzar una moneda es un ejemplo clásico y que puede asumir dos valores: cara y cruz. Por lo tanto, el espacio de estado de esta variable aleatoria discreta es finito y está compuesto por dos valores.

Un fenómeno puede describirse a través de una colección de variables aleatorias, que recibe el nombre de proceso estocástico y se caracterizan por evolucionar en el tiempo (Box *et al.*, 2016). En contraste con las señales deterministas, una señal aleatoria tiene elementos de incertidumbre y por ello no es posible determinar exactamente su valor en un instante dado de tiempo (Cantarella y Fiori, 2022). Así, en un modelo determinista, el investigador supone que conoce con certeza el valor de las variables de entrada, por lo que le asigna valores subjetivos (Gutiérrez-Carmona, 2022). Si todas las variables se consideran libres

de la variación aleatoria tal que ninguna tiene una distribución probabilística, entonces el modelo es considerado como determinístico (Cabrera, 2012). El proceso estocástico se escribe como y_t para $i = 1, 2 \dots n$, si el índice representa tiempo se llamará serie de tiempo. Si se asigna un posible valor de y por cada i se estará construyendo una posible realización del proceso estocástico (Court y Rengifo, 2011).

Para caracterizar un proceso estocástico, basta con especificar la media y la varianza para cada y_t y la covarianza para variables referidas a los distintos valores de t (Bazán-Ramírez, 2020). Dias-Campos (2010) afirma que los modelos tradicionales con aproximaciones lineales son modelos poco eficientes y de aplicabilidad limitada. Por otro lado, los modelos no-lineales necesitan un conocimiento profundo del dominio para su construcción (Han y Wang, 2009). La ventaja de los modelos estocásticos es que permiten derivar series temporales con mayor capacidad para identificar los pormenores de datos ocultos (Herrera, 2013).

Los procesos fisiológicos como la respiración en frutos presentan una gran variabilidad (Ho *et al.*, 2011). Dicha variabilidad estocástica de las propiedades del fruto introduce incertidumbre en las operaciones de almacenamiento y podría resultar en una severa pérdida de calidad (Ho *et al.*, 2016). Gwanpua *et al.* (2014) utilizaron un enfoque de modelado estocástico para predecir de qué forma se propaga la variabilidad inicial de manzanas 'Jonagold' con el monitoreo de la pérdida de color de fondo en poscosecha. Estos autores concluyeron que el modelo desarrollado en dicho estudio cubre la mayoría de los mecanismos importantes asociados con la pérdida del color de fondo verde en las manzanas, y puede extenderse fácilmente a condiciones similares a aquellas bajo las cuales se desarrolló el modelo, proporcionando así una herramienta útil que se puede utilizar en la gestión adecuada de la uniformidad de la calidad dentro de un lote de manzanas. Por otro lado, Tijskens *et al.* (2016) realizaron una modificación al Modelo de crecimiento de Von Bertalanffy, adaptado para incluir la variación de tamaño entre individuos y el efecto de temperatura creciente en frutos de tomate, manzana y pimiento. En esta modificación toman en cuenta esta variación

biológica que siempre está presente y expresada como factor de cambio biológico (Δt). Este factor (Δt) es una variable estocástica, diferente para cada individuo (fruto) y expresa la madurez de dicho individuo. De igual manera, Penchaiya *et al.* (2020) evaluaron la calidad y madurez del mango 'Namdokmai Sithong' y su variación durante el almacenamiento. Estos autores hicieron uso de un modelo cinético de producción de primer orden para describir el comportamiento de las variables de calidad, incluida la variación biológica expresada como factor de cambio biológico, concluyendo que el modelo puede describir adecuadamente el comportamiento observado de los frutos de mango.

2.6. Series de tiempo

De acuerdo con Ramón y López (2016), una serie de tiempo se define como una secuencia de datos, observaciones o valores medidos en determinados momentos del tiempo, ordenados cronológicamente y, normalmente, espaciados entre sí de manera uniforme. Si el conjunto es continuo, se dice que la serie temporal es continua, por el contrario, si el conjunto es discreto, la serie temporal es discreta (Box *et al.*, 2016). El conjunto completo de tiempos $t = 1, 2, \dots, T$, se denominará a menudo período de observación, por lo que el orden en que llegan las observaciones es primordial (Mills *et al.*, 2019). La característica de las series de tiempo estocásticas es que evolucionan alrededor de un nivel que cambia sin seguir aparentemente un patrón concreto, por este motivo, suele decirse que la serie presenta una tendencia estocástica (aleatoria) en su evolución temporal (Mauricio, 2007). Los modelos de series de tiempo predicen valores futuros para la variable de interés basándose exclusivamente en el patrón histórico de esa variable (Masini y Vázquez, 2014). Generalmente, en series de tiempo se consideran 4 componentes: la tendencia, la ciclicidad, la estacionalidad y el componente puramente aleatorio (Alonso y Arcila, 2013) y su análisis hace uso de métodos analíticos para poder determinar las tendencias y las variaciones estacionales (Contreras-Juárez *et al.*, 2016).

2.6.1. Serie estacionaria y no estacionaria

Las series de tiempo se pueden clasificar en estacionarias y no estacionarias. Una serie es estacionaria si su media y varianza son constantes en el tiempo y si el valor de la covarianza entre dos periodos depende solamente de la distancia o rezago entre estos dos periodos de tiempo y no del tiempo en el cual se ha calculado la covarianza (Villavicencio, 2012). Los procesos estocásticos estacionarios se basan en la suposición de que el proceso se encuentra en un estado particular de equilibrio estadístico, pero un proceso estocástico es estrictamente estacionario si sus propiedades no se ven afectadas por un cambio en el origen del tiempo, es decir, si la distribución de probabilidad conjunta asociada con m observaciones $z_{t1}, z_{t2}, \dots, z_{tm}$ realizada en cualquier conjunto de tiempos $t_1, t_2, \dots, t_m$ es la misma que la asociada con m observaciones $z_{t1+k}, z_{t2+k}, \dots, z_{tm+k}$, realizadas en el tiempo $t_1+k, t_2+k, \dots, t_m+k$, por lo que para que un proceso discreto sea estrictamente estacionario, la distribución conjunta de cualquier conjunto de observaciones no debe verse afectada por el desplazamiento de todos los tiempos de observación hacia adelante o hacia atrás en cualquier número entero k (Box *et al.*, 2016). Por otro lado, una serie de tiempo no estacionaria es una serie cuya tendencia y/o variabilidad cambian en el tiempo por lo que no oscilan alrededor de un valor constante (no existe equilibrio estadístico) (Villavicencio, 2012).

2.6.2. Ruido blanco

El ejemplo más fundamental de un proceso estacionario es una secuencia de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, denotadas como $\alpha_1, \dots, \alpha_1$, con la suposición de que tienen media cero y varianza σ^2_a . Este proceso es estrictamente estacionario y se denomina proceso de ruido blanco. Dado que la independencia implica que los α_t están no están correlacionados (Box *et al.*, 2016).

2.7. Modelo ARIMA

Box y Jenkins (1970) desarrollaron una metodología que contempla el análisis de series de tiempo. Este análisis se basa en un modelo explícito con el nombre de ARIMA (Modelo Autorregresivo Integrado de Media Móvil), que deriva de sus tres componentes AR (Autorregresivo), I (Integrado) y MA (Medias Móviles). Los modelos autorregresivos se basan en la idea de que el valor actual de la serie Y_t , puede explicarse en función de p valores pasados, donde p determina el número de rezagos necesarios para pronosticar un valor actual (Villavicencio, 2012). El modelo autorregresivo (AR) de orden p está dado por la Ecuación 1.

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

donde Y_t es la serie actual, ϕ es el parámetro autorregresivo, Y_{t-1} es el valor de la variable de salida en el tiempo de retraso p , p es el número de rezagos y e_t es el ruido blanco.

En el modelo de Media Móvil una determinada observación está condicionada por impulsos aleatorios de las observaciones anteriores. De esta manera la observación actual se define como la suma del impulso actual y de los impulsos aleatorios anteriores con un determinado peso (González, 2009). La terminología media móvil surge del hecho de que Y_t se obtiene aplicando los pesos $1 - \theta_1 - \theta_2 - \theta_3, \dots, -\theta_q$ a las variables $\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots, \varepsilon_{t-q}$ y luego moviendo los pesos y aplicándolos a $\varepsilon_{t+1}, \varepsilon_{t-1}, \dots, \varepsilon_{t-q+1}$ para obtener Y_{t+1} y así sucesivamente. El modelo de media móvil (MA) de orden q está dado por la Ecuación 2.

$$Y_t = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (2)$$

donde Y_t es la serie actual, θ es el parámetro de media móvil, ε_{t-1} es el valor de la variable de salida en el tiempo de retraso q , q es el número de rezagos y e_t es el ruido blanco.

Se dice que una serie de tiempo Y_t sigue un modelo de promedio móvil autorregresivo integrado si la diferencia d es un proceso ARMA estacionario. Para efectos prácticos se puede tomar como máximo $d=2$ (Cryer y Chang, 2008). El modelo ARIMA sigue una combinación de los modelos AR y MA con un integrador, por lo que este modelo está determinado tanto por observaciones anteriores, así como por impulsos aleatorios (errores) de observación pasados. El modelo ARIMA sigue la Ecuación 3.

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3)$$

donde Y_t es la serie actual, ϕ es el parámetro autorregresivo, Y_{t-1} es el valor de la variable de salida en el tiempo de retraso p , p es el número de rezagos, ε_t es el ruido blanco, θ es el parámetro de media móvil, ε_{t-1} es el valor de la variable de salida en el tiempo de retraso q y q es el número de rezagos.

2.7.1. Metodología de Box-Jenkins

La metodología de Box Jenkins consiste en cuatro pasos: la identificación, la estimación, la validación y el pronóstico (Box *et al.*, 2016). Los modelos ARIMA se definen para series temporales estacionarias, es decir, estables en el tiempo, por lo que, si se comienza con una serie temporal no estacionaria, primero deberá "diferenciar" la serie temporal hasta obtener una serie temporal estacionaria. Si se tiene que diferenciar la serie temporal d veces para obtener una serie estacionaria, entonces tiene un modelo ARIMA (p,d,q) , donde d es el orden de diferenciación utilizado (Coghlan, 2018).

La metodología de Box-Jenkins consiste en la elección sobre valores tentativos para p , d y q . Una vez realizado esto se estiman los parámetros ϕ y θ y finalmente se analiza críticamente el modelo ajustado para verificar su idoneidad. Si el modelo parece inadecuado de alguna manera, se considera la naturaleza de la inadecuación para la elección de otro modelo y se procede a estimar ese nuevo modelo y comprobar su adecuación. Con algunas iteraciones de esta estrategia

de creación de modelos, se espera llegar al mejor modelo posible para una serie determinada (Cryer y Chang, 2008).

2.8. Modelo ARIMAX

Es una extensión lógica del modelado ARIMA puro que incorpora variables independientes que agregan valor explicativo. Cuando los términos AR y MA en un modelo ARIMA puro no son suficientes para proporcionar un poder explicativo aceptable de un modelo, es natural buscar otros fenómenos impulsores cuya influencia a lo largo del tiempo no está suficientemente arraigada en los valores históricos de las series de tiempo dependientes. Cuando un modelo ARIMA incluye otras series temporales como variables de entrada, el modelo se denomina ARIMAX, es decir, además de los valores pasados de la serie de respuesta y los errores pasados, la serie de respuesta se modela utilizando los valores actuales y pasados de la serie de entrada (Alam *et al.*, 2018; Sanjeev y Verma, 2016). A este modelo se le conoce también como función de transferencia (González-Vallejo, 2017).

Un modelo ARMAX simplemente agrega la covariable en el lado derecho como se muestra en la Ecuación 4. La construcción de los modelos de función de transferencia sigue las mismas etapas que la construcción de los modelos univariantes de series temporales: identificación, estimación, verificación y predicción (Box *et al.*, 2016).

$$Y_t = \beta x_1 + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (4)$$

donde x_1 es una covariable en el tiempo t y β es el coeficiente.

2.9. Causalidad de Granger

La existencia de una correlación entre dos variables no implica causalidad, es decir que una variable se correlacione con otra no implica siempre que una de ellas sea la causa de las alteraciones en los valores de otra. Las causas y consecuencias se deducen de la razón que, entre otras fuentes, se puede obtener y cultivar en el estudio de la literatura científica (Montero-Granados, 2013). La prueba de causalidad de Granger, es una prueba estadística empleada para determinar si una serie temporal puede predecir a otra. Se basa en la idea de que una variable x sería causal a una variable y si x pudiera ser interpretada como la causa de y y/o y fuera un efecto de x donde los valores actuales y rezagados de x son también tomados en cuenta (Rodríguez-Caballero, 2011). Para realizar esta prueba es necesario que se cumplan los siguientes requisitos: a) las variables x y y deben ser estacionarias y b) los términos de error en la prueba de causalidad no están correlacionados (González, 2017).

2.10. Literatura citada

- Aguirre-Joya, J. A., Ventura-Sobrevilla, J., Martínez-Vázquez, G., Ruelas-Chacón, X., Rojas, R., Rodríguez-Herrera, R., & Aguilar, C. N. (2017). Effects of a natural bioactive coating on the quality and shelf-life prolongation at different storage conditions of avocado (*Persea americana* Mill.) cv. Hass. *Food Packaging and Shelf Life*, 14, 102–107. doi: 10.1016/j.fpsl.2017.09.003.
- Alam, W., Ray, M., Kumar, R. R., Sinha, K., Rathod, S., & Singh, K. N. (2018). Improved ARIMAX model based on ANN and SVM approaches for forecasting rice yield using weather variables. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 88 (12), 1909–1913.
- Alonso, J., & Arcila, A. (2013). Empleo del comportamiento estacional para mejorar el pronóstico de un commodity: el caso del mercado internacional de azúcar. *Estudios Gerenciales*, 29 (129), 406-415. doi: 10.1016/j.estger.2013.11.006.
- Araújo-Gonzalez, R., Rodríguez-Jasso, R., Ruiz, H., Pintado, M. M., & Aguilar, C. (2018). Avocado by-products: Nutritional and functional properties. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 51-60. doi: 10.1016/j.tifs.2018.07.027.
- Arpaia, M. L., Collin, S., Sievert, J., & Obenland, D. (2015). Influence of cold storage prior to and after ripening on quality factors and sensory attributes of 'Hass' avocados. *Postharvest Biology and Technology*, 110, 149–157. doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.07.016.
- Ayhan, Z. (2019). Packaging and the shelf life of fruits and vegetables. *Reference Module in Food Science*, Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.22649-8.
- Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R. I., & Ramos-García, M. de L. (2020). Avocado, In Palou, L., Smilanick J. L. (Eds.), *Postharvest pathology of fresh horticultural produce* (pp. 227-256). CRC Press, New York: Taylor and Francis Group.

- Bazán-Ramírez, W. (2020). Fundamentos para pronosticar una serie de tiempo estacionaria con información de su propio pasado. *Industrial Data*, 23, (1), 207-228. doi: 10.15381/idata.v23i1.16504
- Bernal-Estrada, J. A. & Díaz-Díez, C. A. (2020). Actualización tecnológica y buenas prácticas agrícolas (BPA) en el cultivo de aguacate. (2ª ed.). Colombia. AGROSAVIA. doi: 10.21930/agrosavia.manual.7403831.
- Bill, M., Sivakumar, D. Thompson, A. K., & Korsten, L. (2014). Avocado fruit quality management during the postharvest supply chain. *Food Reviews International*, 30 (3), 169-202. doi: 10.1080/87559129.2014.907304.
- Bouzayen, M., Latché, A., Nath, P., & Pech, J. C. (2010). Mechanism of fruit ripening. In Pua, E. C. & Davey, M. R. (Eds.), *Plant developmental biology-biotechnological perspectives* (pp. 319-334). Germany: Springer-Verlag.
- Bovi, G., Ruxa, G., Caleb, O., Herppich, W., Linke, M., Rauh, C., & Mahajan, P. (2018). Measurement and modelling of transpiration losses in packaged and unpackaged strawberries. *Biosystems Engineering*, 174, 1-9. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.06.012.
- Box, G. E. P., & Jenkins, G. M. (1970). Time Series Analysis: Forecasting and Control. Oakland, CA: Holden Day Inc.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2016). Time Series Analysis: Forecasting and Control (5th ed.) . New Jersey: Wiley and Sons Inc. Hoboken.
- Cabrera, J. (2012). Modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Ni-o, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú, 8
- Caleb, O. J., Mahajan, P.V., Al-Said, F. A., & Opara, U. L. (2013). Transpiration rate and quality of pomegranate arils as affected by storage conditions. *CyTA-Journal of Food* 11 (3), 199–207. doi: 10.1080/19476337.2012.721807.

- Calvo, G., Candan, A. P., & Colodner, A., & Gomila, T. (2018). Tecnología de poscosecha de fruta de pepita (1a ed). Río Negro: Ediciones INTA.
- Cantarella, G. E., & Fiori, C. (2022). Multi-vehicle assignment with elastic vehicle choice behaviour: Fixed-point, deterministic process and stochastic process models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 134, 103429. doi: 10.1016/j.trc.2021.103429.
- Cartagena-Cutipa, R., Velázquez-Ccosi, P. F., Carhuaz-Valdez, D. D., & Rivera-Herrera, H. J. (2020). Evaluación de algunos parámetros físicos de *Persea americana* mediante un equipo de medición de postcosecha. *Ingeniería Investiga*, 2 (1).
- Casas-Sánchez, J. M., Cortiñas-Vázquez, P., & Zamora-Sanz, A. I. (2010). Estadística económica y empresarial. Distribuciones e inferencia. España: Editorial Universitaria Ramón Areces.
- Castellanos, D. A., Mendoza, R., Gavara, R., & Herrera, A. (2017) Respiration and ethylene generation modeling of “Hass” avocado and feijoa fruits and application in modified atmosphere packaging. *International Journal of Food Properties*, 20 (2), 333-349. doi: 10.1080/10942912.2016.1160921
- Castellanos, D. A., Herrera, D. R., & Herrera, A. O. (2016). Modelling water vapour transport, transpiration and weight loss in a perforated modified atmosphere packaging for feijoa fruits. *Biosystems Engineering*, 151, 218-230. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.08.015.
- Chemere, B., Kim, M., Peng, J., & Kim, B. (2018). Detecting dry matter yield trend of whole crop maize considering the climatic factors in the Republic of Korea. *Grassland Science*, 65, 116–124. doi: 10.1111/grs.12220.
- Coghlán, A. (2018). A Little Book of R for Time Series. Release 0.2. Parasite Genomics Group. Trust Sanger Institute, Cambridge, U.K. Consultado en <https://www.studocu.com/row/document/jomo-kenyatta-university-of-agriculture-and-technology/bsc-economics/a-little-book-of-r-for-time-series/14303004>.

- Contreras-Juárez, A., Atziry-Zuñiga, C., Martínez-Flores, J. L., & Sánchez-Partida, D. (2016). Análisis de series de tiempo en el pronóstico de la demanda de almacenamiento de productos perecederos. *Estudios Gerenciales*, 32, 387–396. doi: 10.1016/j.estger.2016.11.002.
- Crisosto, C. H., Echeverría, G., & Manganaris, G. A. (2020a). Peach and nectarine, In Crisosto, A.H., Crisosto, G.M. (Eds.), *Manual on postharvest handling of mediterranean tree fruits and nuts*. Boston: CABI.
- Crisosto, C. H., López-Corrales, M., Colleli, G., & Serradilla, M. J. (2020b). Fresh fig, In Crisosto, A.H., Crisosto, G.M. (Eds.), *Manual on postharvest handling of mediterranean tree fruits and nuts*. Boston: CABI.
- Cryer, J. D., & Chan, K. S. (2008). Time Series Analysis With Applications in R (2nd ed.). Springer: USA.
- Dias-Campos, L. C. (2010). Modelo estocástico periódico baseado em redes neurais. (Tesis de doctorado, Pontificia Universidade Católica do rio de Janeiro, Brasil). Consultada en http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/PUC_RIO1_22d0586eb0a59d7597b3e3fcd6f32838
- Donetti, M. & Terry, L. A. (2012). Investigation of skin color changes as nondestructive parameter of fruit ripeness of imported ‘Hass’ avocado fruit. *Acta Horticulturae*, 945, 189–196. doi:10.17660/actahortic.2012.945.25.
- Dorantes-Álvarez, L., Ortiz-Moreno, A., & García-Ochoa, F. (2012). Avocado, In Siddiq, M (Ed.), *Tropical and subtropical fruits postharvest physiology, processing and packaging* (pp. 437-454). Oxford: Willey.
- Ekman, J., Golwater, A., & Winley, E. (2016). Postharvest management of vegetables. Australian supply chain handbook. *Horticulture Innovation Australia*. Consultado en https://www.melonsaustralia.org.au/wp-content/uploads/2018/12/Postharvest_Vegetable_Book.pdf
- Gómez-Aldapa, C. A., Torres-Vitela, M. R., Amaya-Acosta, M. A., Rangel-Vargas, E., Villaruel-López, A., & Castro-Rosas, J. (2016). Behavior of thirteen

- foodborne bacteria on whole Hass avocado and potential of roselle calyx extracts as alternative disinfectant agents of avocado. *Journal of Food Safety*, 37 (4), e12351 doi: 10.1111/jfs.12351.
- Gong, D. D., Cao, S. F., Sheng, T., Shao, J. R., Song, C. B., Wo, F. C., Chen, W., & Yang, Z. F. (2015). Effect of blue light on ethylene biosynthesis, signalling and fruit ripening in postharvest peaches. *Scientia Horticulturae*, 197, 657–664. doi: 10.1016/j.scienta.2015.10.034.
- González, C. P. M. (2009). Análisis de Series Temporales: Modelos ARIMA. Universidad del País Vasco (UPV-EHU). ISBN: 978-84-692-3814-1. Consultado en <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/12492/04-09gon.pdf>.
- González-Vallejo, C. L. (2017). Stress testing de la morosidad del crédito de consumo en el sistema financiero Ecuatoriano. (Tesis pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador). Consultada en <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17448?mode=full>
- Grande-Tovar, C. D., Chaves-López, C., Serio, A., Rossi, C., & Paparella A. (2018). Chitosan coatings enriched with essential oils: effects on fungi involved in fruit decay and mechanisms of action. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 61–71. doi: 10.1016/j.tifs.2018.05.019.
- Guadarrama, A., & Peña, Y. (2013). Actividad respiratoria vs. variaciones físicas y químicas en la maduración de frutos de naranjita china (*Citrus x microcarpa* Bunge). *Bioagro*, 25 (1), 57-63. Consultado en <http://ve.scielo.org/pdf/ba/v25n1/art07.pdf>.
- Gutiérrez-Carmona, J. (2022). Modelos financieros con Excel. Herramientas para mejorar la toma de decisiones (4ta ed.). Bogotá: ECOE Ediciones.
- Gwanpua, S. G., Vicent, V., Verlinden, B. E., Hertog, M., Nicolai, B. M., & Geeraerd, A. H. (2014). Managing biological variation in skin background colour along the post-harvest chain of ‘Jonagold’ apples. *Postharvest*

Biology and Technology, 93, 61–71. doi: 10.1016/j.postharvbio.2014.02.008.

- Han, M., & Wang, Y. (2009). Analysis and modeling of multivariate chaotic time series based on neural network. *Expert Systems with Applications*, 36 (2, Part 1), 1280-1290. doi: 10.1016/j.eswa.2007.11.057.
- Herrera, J. (2013). Modelo estocástico a partir de razonamiento basado en casos para la generación de series temporales. (Tesis de doctorado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú). Consultada en http://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/346/6/2013_Herrera_Modelo-estocastico-razonamiento.pdf
- HersHKovitz, V., Friedman, H., Goldschmidt, E. E., Feygenberg, O., & Pasis, E. (2009). Induction of ethylene in avocado fruit in response to chilling stress on tree. *Journal of Plant Physiology*, 166, (17), 1855-1862. doi: 10.1016/j.jplph.2009.05.012.
- Ho, Q. T., Rogge, S., Verboven, P., Verlinden, B. E., Nicolai, B. M. (2016). Stochastic modelling for virtual engineering of controlled atmosphere storage of fruit. *Journal of Food Engineering*, 176, 77–87. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.07.003.
- Ho, Q. T., Verboven, P., Verlinden, B. E., Herremans, E., Wevers, M., Carmeliet, J., & Nicolai, B. M. (2011). A three-dimensional multiscale model for gas exchange in fruit. *Plant Physiology*, 155 (3), 1158–1168. doi: 10.1104/pp.110.169391.
- Ilić, Z. S., & Fallik, E. (2017). Light quality manipulation improves vegetable quality at harvest and postharvest: a review. *Environmental and Experimental Botany*, 139, 79–90. doi: 10.1016/j.envexpbot.2017.04.006.
- Jafarzadeh, S., Mohammadi Nafchi, A., Salehabadi, A., Oladzad-abbasabadi, N., & Jafari, S. M. (2021). Application of bio-nanocomposite films and edible coatings for extending the shelf life of fresh fruits and vegetables.

- Advances in Colloid and Interface Science*, 291, 102405. doi: 10.1016/j.cis.2021.10240.
- Kader, A. A. (2011). Postharvest technology of horticultural crops (3^a ed.). University of California, Agriculture and Natural Resources.
- Kader, A. & Arpaia, M. (2012). Calidad postcosecha en aguacate. Consultado en <https://www.tecnicoagricola.es/calidad-postcosecha-en-aguacate/>
- Kassim, A., Workneh, T., & Bezuidenhout, C. (2013). A review on postharvest handling of avocado fruit. *African Journal of Agricultural Research*, 8 (21), 2385–2402. doi: 10.5897/AJAR12.1248.
- Kovatchev, B., & Patek. (2014). Stochastic Models of Physiology (2nd ed.). In Carson, E., Cobelli, C. Modelling Methodology for Physiology and Medicine (pp. 231-256). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-411557-6.00011-2.
- Ktenioudaki, A., O'Donnell, C. P., & Nunes, M. C. N. (2019). Modelling the biochemical and sensory changes of strawberries during storage under diverse relative humidity conditions. *Postharvest Biology and Technology*, 154, 148-158. doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.04.023.
- Lester, G. B., Makus, D. J., & Hodges, D. M. (2010). Relationship between fresh-packaged spinach leaves exposed to continuous light or dark and bioactive contents: Effects of cultivar, leaf size, and storage duration. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58 (5), 2980-2987. doi: <https://doi.org/10.1021/jf903596v>.
- Li, P., Zheng, X., Liu, Y., & Zhu, Y. (2014). Pre-storage application of oxalic acid alleviates chilling injury in mango fruit by modulating proline metabolism and energy status under chilling stress. *Food Chemistry*, 142, 72–78. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.06.132.
- Li, Y., Xin, G., Wei, M., Shi, Q., Yang, F., & Wang, X. (2017). Carbohydrate accumulation and sucrose metabolism responses in tomato seedling leaves when subjected to different light qualities. *Scientia Horticulturae*, 225, 490–497. doi: 10.1016/j.scienta.2017.07.053.

- Lima, J. P., Rodrigues, L. F., Monteiro, A. G. D. P., & Vilas-Boas, E. V. B. (2015). Climacteric pattern of mangaba fruit (*Hancornia speciosa* Gomes) and its responses to temperature. *Scientia Horticulturae*, 197, 399–403. doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.059.
- Lin, K. H., Huang, M. Y., Huang, W. D., Hsu, M. H., Yang, Z. W., & Yang, C. M. (2013). The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*). *Scientia Horticulturae*, 150, 86–91. doi: 10.1016/j.scienta.2012.10.002.
- Liu, L. H., Zarabas, D., Bennett, L., Aguas P., & Wooton, B. W. (2009). Effects of UV-C, red light and sun light on the carotenoid content and physical qualities of tomatoes during post-harvest storage. *Food Chemistry*, 115 (2), 495-500. doi: 10.1016/j.foodchem.2008.12.042.
- Loza-Hernández, A. (2015). Situación actual del sistema producto aguacate. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA). Consultada en: <http://www.cedrssa.gob.mx/files/10/16Situaci%C3%B3n%20actual%20del%20sistema%20producto%20aguacate.pdf>
- Maftoonazad, N., & Ramaswamy, H. (2008). Effect of pectin-based coating on the kinetics of quality change associated with stored avocados. *Journal of Food Processing and Preservation*, 32 (4), 621–643. doi: 10.1111/j.1745-4549.2008.00203.x
- Magwaza, L. S., & Tesfay, S. Z. (2015). A Review of Destructive and Non destructive Methods for Determining Avocado Fruit Maturity. *Food and Bioprocess Technology*, 8 (10), 1995–2011. doi:10.1007/s11947-015-1568-y.
- Mahajan, P. V., Oliveira, F. A. R., & Macedo, I. (2008). Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of the whole mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 84 (2), 281–288. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.05.021.

- Martínez-González, M. E., Balois-Morales, R., Alia-Tejacal, I., Cortes-Cruz, M. A., Palomino-Hermosillo, Y. A., & López-Gúzman, G. G. (2017). Poscosecha de frutos: maduración y cambios bioquímicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 19, 4075-4087. doi: 10.29312/remexca.v0i19.674.
- Masini, J. A., & Vázquez, L. F. (2014). Compendio de Modelos Cuantitativos de Pronósticos: El primer paso en las decisiones tácticas, es predecir la demanda. Disponible en <https://books.google.com.mx/books?id=fnLcBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q=los%20metodos%20&f=false>
- Mauricio, J. A. (2007). Introducción al Análisis de Series Temporales. Universidad Computense de Madrid. Consultado en <https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-11-JAM-IASST-Libro.pdf>
- Medina, M. S., Tudela, J. A., Marín, A., Allende, A., & Gil, M. I. (2012). Short postharvest storage under low relative humidity improves quality and shelf life of minimally processed baby spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Postharvest Biology and Technology*. 67, 1–9. doi: 10.1016/j.postharvbio.2011.12.002.
- Mihaly, C. A., Mihaly, C. L., Peter, A., Nicula, C., Vosgan, Z., Giurgiulescu, L., Vulpoi, A., & Baia, M. (2016). Effect of monochromatic Far-Red light on physical-nutritional-microbiological attributes of red tomatoes during storage. *Scientia Horticulturae*, 211, 220–230. doi: 10.1016/j.scienta.2016.08.031.
- Millar, A. H., Whelan, J., Soole, K. L., & Day, D. A. (2011). Organization and regulation of mitochondrial respiration in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 62, 79-104. doi: 10.1146/annurev-arplant-042110-103857.
- Mills, T. C. (2019). Applied Time Series Analysis. A Practical Guide to Modeling and Forecasting. London: Academic Press. doi: 10.1016/C2016-0-03956-6.

- Montero-Granados, R. (2013). Test de Causalidad. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada. Universidad de Granada. Consultado en <https://www.ugr.es/~montero/matematicas/causalidad.pdf>
- Montero-Calderón, M., & Cerdas-Araya, M. de M. (2012). Postharvest Physiology and Storage In Siddiq, M (Ed.), Tropical and subtropical fruits postharvest physiology, processing and packaging (pp. 17-34). Oxford: Willey.
- Murmu, S. B., & Mishra, H. N. (2016). Measurement and modeling the effect of temperature, relative humidity and storage duration on the transpiration rate of three banana cultivars. *Scientia Horticulturae*, 209, 124–131. doi: 10.1016/j.scienta.2016.06.011.
- Nabi, D. B., & Ahmad, M. S. (2020). Emerging technologies for shelf-life enhancement of fruits (1a ed). New York: Apple Academic Press, CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Özdemir, I. S. (2016). Effect of light treatment on the ripening of banana fruit during postharvest handling. *Fruits*, 71 (2), 115-122. doi: 10.1051/fruits/2015052.
- Penchaiya, P., Tijskens, L. M. M., Uthairatanakij, A., Srilaong, V., Tansakul, A., & Kanlayanarat, S. (2020). Modelling quality and maturity of 'Namdokmai Sithong' mango and their variation during storage. *Postharvest Biology Technology*, 159, 111000. doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.111000.
- Pérez-López, A., Chávez-Franco, S. H., Villaseñor-Perea, C. A., Espinosa-Solares, T., Hernández-Gómez, L. H., & Lobato-Calleros, C. (2014). Respiration rate and mechanical properties of peach fruit during storage at three maturity stages. *Journal of Food Engineering*, 142, 11-117 doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.06.007.
- Ramón-Escolano, N. & López-Espín, J. J. (2016). Econometría. Series temporales y modelos de ecuaciones simultáneas. España: UMH.

- Rodríguez-Caballero, C. V. (2011). Ensayos sobre la Granger Causalidad. (Tesis de maestría, Universidad de Guanajuato). Consultada en <http://c-vladimir-rodriguez-caballero.weebly.com/uploads/6/6/5/9/66590417/master2.pdf>
- Rodríguez-Fonseca, P., Escobar, J. & Grisales, N. (2019). Protocolo de almacenamiento y maduración de aguacate cv. Hass (*Persea americana* Mill.) en Antioquia. Colombia. AGROSAVIA. ISBN obra digital: 978-958-740-295-7.
- Saltveit, M. E. (2016). Respiratory metabolism. In Sunil P. (Ed.), *Postharvest Ripening Physiology of Crops* (pp: 139- 156). New York: CRC Press.
- Sanjeev, S. & Verma, U. (2016). ARIMA versus ARIMAX modelling for sugarcane yield prediction in Haryana. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*, 12 (2), 327-334.
- Sanz, S., Olarte, C., Ayala, F., & Echávarri, J. (2009). Evolution of quality characteristics of minimally processed asparagus during storage in different lighting conditions. *Journal of Food Science*, 74 (6), S296-302. doi: 10.1111/j.1750-3841.2009.01239.x.
- Sun, Y., Qian, M., Wu, R., Niu, Q., Teng, Y., & Zhang, D. (2014). Postharvest pigmentation in red Chinese sand pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai) in response to optimum light and temperature. *Postharvest Biology and Technology*, 91, 64-71. doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.12.015.
- Theodoridis, S. (2020). Probability and Stochastic Processes (2nd ed.). In Machine Learning A Bayesian and Optimization Perspective (9-51). Academic Press. doi: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-03772-7>
- Tijskens, L. M. M., Unuk, T., Okello, R. C. O., Wubs, A. M., Šuštar, V., Šumak, D., & Schouten, R. E. (2016). From fruitlet to harvest: Modelling and predicting size and its distributions for tomato, apple and pepper fruit. *Scientia Horticulturae*, 204, 54-64. doi: 10.1016/j.scienta.2016.03.036.

- Toivonen, P. M. A. (2016). Postharvest Physiology of Fruits and Vegetables. In Sunil P. (Ed.), *Postharvest Ripening Physiology of Crops* (pp: 49- 72). New York: CRC Press.
- Tonetto, de F. S., & Pareek, S. (2019). Postharvest Physiological Disorders in Fruits and Vegetables. New York: CRC Press-Taylor and Francis.
- Tremocoldi, M. A., Rosalen, P. L., Franchin, M., Massarioli, A. P., Denny, C., Daiuto, É. R., Paschoal, J. A. R., Melo, P.S., & De Alencar, S. M. (2018). Exploration of avocado by-products as natural sources of bioactive compounds. *PLoS one* 13 (2), e0192577. doi: 10.1371/journal.pone.0192577.
- Villa-Rodriguez, J., Yahia, E. M., Gonzalez-Leon, A., Idolo, I., Robles-Zepeda, R. E., Dominguez-Avila, A., & Gonzalez-Aguilar, G. (2020). Ripening of 'Hass' avocado mesocarp alters its phytochemical profile and the in vitro cytotoxic activity of its methanolic extracts. *South African Journal of Botany*, 128, 1-8. doi: 10.1016/j.sajb.2019.09.020.
- Villavicencio, J. (2012). Introducción a series de tiempo. Consultado en http://www.estadisticas.gobierno.pr/iepr/LinkClick.aspx?fileticket=4_BxecUaZmg%3D
- Wang, Z., Narciso, J., Biotteau, A., Plotto, A., Baldwin, E., & Bai, J. (2014). Improving storability of fresh strawberries with controlled release chlorine dioxide in perforated clamshell packaging. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 3516–3524. doi: 10.1007/s11947-014-1364-0.
- Wills, R., & Golding, J. (2016). Postharvest: an introduction to the physiology and handling of fruit and vegetables. *Nutrition and food sciences*. doi: 10.1079/9781786391483.0000.
- Wills, R., McGlasson, B., Graham, D., & Joyce, D. (2007). Postharvest: An Introduction to the Physiology and Handling of Fruit, Vegetables and Ornamentals (5^a ed). CABI Publishing.

- Wu, Q., Zhou, Y., Zhang, Z., Li, T., Jiang, Y., Gao, H., & Yun, Z. (2020). Effect of blue light on primary metabolite and volatile compound profiling in the peel of red pitaya, *Postharvest Biology and Technology*, 160, 111059. doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.111059.
- Wu, W., Beretta, C., Cronje, P., Hellweg, S., & Defraeye, T. (2019). Environmental trade-offs in fresh-fruit cold chains by combining virtual cold chains with life cycle assessment. *Applied Energy*, 254, 113586. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113586.
- Xanthopoulos, G. T., Templalexis, C. G., Aleiferis, N. P., & Lentzou, D. I. (2017). The contribution of transpiration and respiration in water loss of perishable agricultural products: the case of pears. *Biosystems Engineering*, 158, 76–85. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.03.011.
- Xie, B. X., Wei, J. J., Zhang, Y. T., Song, S. W., Su, W., Sun, G. W., Hao, Y.W., & Liu, H.C. (2019). Supplemental blue and red light promote lycopene synthesis in tomato fruits. *Journal of Integrative Agriculture*, 18 (3), 590–598. doi: 10.1016/S2095-3119(18)62062-3.
- Yahia, E. (2017). Frutos Climáticos y No Climáticos. Intagri S.C. Consultado en <https://www.intagri.com/articulos/poscosecha-comercializacion/frutos-climatericos-y-no-climatericos>
- Yahia, E. M. (2019). Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities. Elsevier-Woodhead Publishing.
- Zapata, J. E., Ochoa, A. S., Ceja E. J., Gómez, V. F. A, & Ríos, M. A. F. (2014). Manual técnico poscosecha del aguacate Hass (*Persea americana* Mill). Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB). ISBN: 978-958-8843-11-7.
- Zhu, Y., Cheng, Z., Feng, K., Chen, Z., Cao, C., Huang, J., Ye, H., & Gao, Y. (2022). Influencing factors for transpiration rate: A numerical simulation of an individual leaf system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 27, 101110. doi: 10.1016/j.tsep.2021.101110.

3. MODELADO DE LA VELOCIDAD DE RESPIRACIÓN EN FRUTOS DE AGUACATE 'HASS' MEDIANTE MODELOS ARIMAX

3.1. Introducción

El aguacate (*Persea americana* Mill) es un fruto climatérico caracterizado por una alta velocidad de respiración (Tesfay *et al.*, 2017). Esta acelerada velocidad de respiración limita su periodo de vida útil (Aguirre-Joya *et al.*, 2017), contribuyendo así a las pérdidas poscosecha de este producto perecedero. Aunado a ello, las fluctuaciones en las condiciones de almacenamiento le añaden mayor complejidad (Jalali *et al.*, 2020).

Existen múltiples factores externos que de manera conjunta influyen sobre la velocidad de respiración de tejidos vegetales (Kader y Yahia, 2011). Factores tales como la temperatura, la composición del aire, la humedad relativa, la luz, los daños mecánicos, la composición de la atmósfera y la respuesta a cambios microbiológicos y fisiológicos (Montero-Calderón y Cerdas Araya, 2012; Pérez-López *et al.*, 2020) son una prueba de ello. La temperatura es una de las principales causas del deterioro general de la calidad de las frutas y hortalizas frescas (Ktenioudaki *et al.*, 2019). Estudios previos han cuantificado el efecto de esta variable sobre la velocidad de respiración en frutos tales como la granada (Caleb *et al.*, 2012) y mango (Ravindra y Goswami, 2008) en atmósferas modificadas. Estos autores encontraron que, por efecto de la temperatura, la velocidad de respiración tuvo un incremento de 5.67 a 18.53 mL kg⁻¹ h⁻¹ en el rango de 5 a 15 °C y de 31.25 a 72.80 mL kg⁻¹ h⁻¹ en el rango de 5 a 30 °C respectivamente, confirmando así que las temperaturas bajas reducen la actividad fisiológica de la fruta, incluida su velocidad de respiración (García *et al.*, 2022).

Se ha demostrado también que los productos frescos requieren condiciones de alta humedad relativa durante el almacenamiento y el transporte (Liplap *et al.*, 2013). Kassim y Seyoum (2020) evaluaron la pérdida de agua en aguacate 'Hass' a humedades relativas altas (85 %) y bajas (53 %), donde la humedad relativa más baja favoreció en mayor medida la pérdida de agua

Los niveles de iluminación también tienen influencia en la actividad fisiológica de productos hortofrutícolas. (Sanz *et al.*, 2009) estudiaron el efecto de diferentes tipos de iluminación (luz blanca, verde, roja y azul) sobre espárragos mínimamente procesados almacenados a 4 °C. Encontraron que su vida útil disminuyó de 11 a 3 días para muestras mantenidas bajo luz roja y verde, y a 7 días en los mantenidos bajo luz blanca y azul.

A lo largo de los años, la velocidad de respiración de diversos frutos se ha estudiado ampliamente con modelado de tipo determinista. Sin embargo, la presencia de eventos aleatorios puede modificar el comportamiento respiratorio de estos frutos en poscosecha. El empleo de otro tipo de modelos basados en probabilidad y estadística son una alternativa para calcular su valor futuro con cierto nivel de confiabilidad (Ho *et al.*, 2016). El modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) propuesta por Box-Jenkins es una metodología bien establecida (Box *et al.*, 2015) que expresa la observación en el tiempo t como una función lineal de observaciones anteriores, un término de error actual y una combinación lineal de términos de error anteriores (Ruby-Figueroa *et al.*, 2017). Este modelo considera un conjunto de datos conocidos como series de tiempo, espaciados de manera cronológica y uniforme en el tiempo. Se denota por ARIMA (p,d,q) , que es una combinación de un componente autorregresivo (AR) y media móvil (MA) con orden de diferenciación (d) , donde p y q son del orden de AR y MA respectivamente. Una generalización del modelo ARIMA es el modelo autorregresivo integrado de media móvil con variables exógenas (ARIMAX) el cual es capaz de incorporar una o más variables de entrada a la serie de tiempo de salida mediante correlación cruzada. En este sentido, a las variables exógenas se les denomina variables de entrada y a la variable de interés se le denomina variable de salida. La estructura general de un modelo ARIMAX se muestra en la Ecuación 5 (Chemere *et al.*, 2018).

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + Z \quad (5)$$

donde $\hat{y}_t$ es el valor de la variable de salida en el tiempo actual, $\hat{y}_{t-p}$ es el valor de la variable de salida en el tiempo de retraso p , ε_{t-q} es el residuo en el tiempo de retraso q , ϕ_p y θ_q son los valores de los parámetros del componente autorregresivo y media móvil respectivamente, ε_t es el ruido blanco, β_p es el coeficiente de la variable externa x en el tiempo t , y Z es un término constante.

Un primer acercamiento de los modelos ARIMAX a procesos fisiológicos en frutos es el estudio realizado por Pérez-López *et al.* (2020), donde dilucidaron la influencia de la temperatura, humedad relativa e iluminación sobre la velocidad de respiración en frutos de durazno, encontrando que el modelo es confiable para predecir la velocidad de respiración con la presencia de factores externos.

El comportamiento estocástico de la velocidad de respiración de un fruto y de los factores externos que lo afectan, permiten modelar su comportamiento conjunto mediante modelado estocástico. Por lo que el objetivo de esta investigación fue desarrollar y probar un modelo matemático adecuado para cuantificar el efecto de 3 variables externas que fueron temperatura, humedad relativa e iluminación sobre la velocidad de respiración en frutos de aguacate 'Hass'. Los resultados obtenidos proporcionarán información básica para el manejo poscosecha de este producto hortofrutícola.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Material experimental

Se cosecharon frutos de aguacate 'Hass' de un huerto perteneciente a la Fundación Salvador Sánchez Colín ubicada en el municipio de Temascaltepec (19°02'40.0"N 99°58'35.6"W), México.

Los frutos se cosecharon en madurez fisiológica con coloración uniforme, un porcentaje de materia seca de 24.3 ± 1.2 % y su peso osciló entre 170-200 g. Los frutos se trasladaron el mismo día de cosecha al laboratorio de bioprocesos de la Universidad Autónoma Chapingo. Se realizó una selección con base en la

uniformidad en el color de la piel y libre de daños mecánicos. Los frutos se dejaron a condiciones de laboratorio (20 ± 2 °C; 30 – 50 % de humedad relativa) durante 12 horas para su aclimatación antes de realizar las mediciones. La investigación se dividió en dos partes: la primera parte consistió en la medición de la actividad respiratoria de los frutos de aguacate ‘Hass’ para su estudio a través del modelado, la segunda parte consistió en la evaluación de las variables de calidad (pérdida de peso, color, firmeza, sólidos solubles totales y acidez titulable) como variables complementarias en el estudio.

3.2.2. Medición de actividad respiratoria y variables exógenas

La velocidad de respiración se cuantificó mediante un sistema modificado de flujo continuo propuesto por Pérez-López *et al.* (2014) (Figura 2). Este sistema consiste en un compresor de aire, un tablero colector de válvulas micrométricas para regular el flujo de aire y recipientes con cierre hermético en donde se colocaron frutos de peso conocido (aprox. 500 g). En el interior de estos recipientes se colocaron también sensores de la marca HOBO (TELAIRE-7001, Onset Computer Corporation, MA, USA) conectados a un sistema de adquisición de datos de la marca HOBO (U12-012, Onset Computer Corporation, MA, USA). Estos sensores se programaron para registrar datos cada 2 minutos de forma continua en una computadora personal a través del programa HOBOWare® Lite v. 3.1.0 (Onset Computer Corporation, MA, USA). Las variables registradas fueron: CO₂ (ppm), temperatura (°C), humedad relativa (%) e iluminación (lux). Ésta última variable consistió en determinar la cantidad de luz proyectada sobre la superficie de los frutos evaluados en condiciones de laboratorio. Las mediciones se realizaron hasta que los frutos alcanzaron madurez de consumo, este periodo tuvo una duración de 11 días. Posteriormente se realizaron los cálculos para obtener la velocidad de respiración de acuerdo con la Ecuación 6 (Pérez-López *et al.*, 2014).

$$R = \left(\frac{CO_{2out} - CO_{2in}}{100} \right) \left(\frac{F}{W} \right) \quad (6)$$

donde R es la velocidad de respiración en términos de CO_2 expresada en $\text{mL kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$, CO_{2out} y CO_{2in} son las concentraciones de CO_2 en la salida y entrada del recipiente, respectivamente. F es el flujo de aire que pasa a través tablero colector de válvulas micrométricas en mL h^{-1} y W es el peso de los frutos dentro del recipiente en kg.

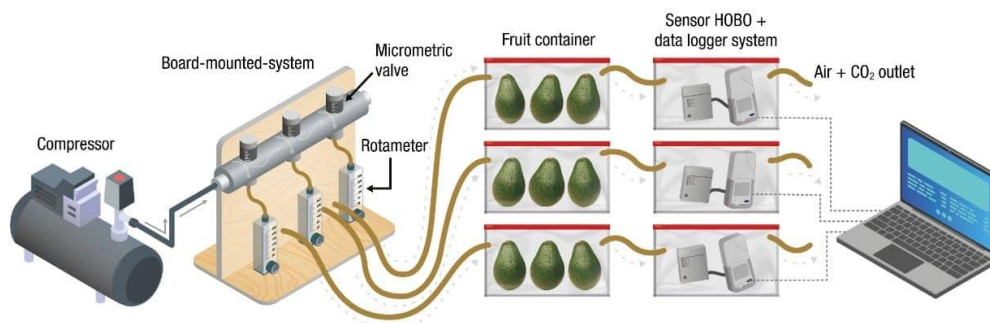


Figura 2. Diagrama del sistema de medición de actividad respiratoria con flujo continuo.

3.2.3. Medición de variables de calidad

3.2.3.1. Pérdida de peso

El peso de los aguacates se midió con una balanza electrónica digital OHAUS® (Adventurer Pro, AV810, USA) y sensibilidad de 0.1 g. Esta variable se registró diariamente y por triplicado hasta alcanzar la madurez de consumo.

3.2.3.2. Firmeza

Se evaluó utilizando un penetrómetro Effegi® (FT 327, México) retirando la cáscara de todo el fruto y midiendo la fuerza en la zona ecuatorial. Las mediciones se realizaron por triplicado y los datos se reportaron en Newtons (N).

3.2.3.3. Color

Se evaluó el cambio de coloración de la epidermis en tres puntos de la zona ecuatorial de los frutos de aguacate, con un espectrofotómetro de esfera portátil X-Rite® (SP64, USA) que registró los datos en escala CIELAB (L^* , a^* y b^*). Las mediciones se realizaron diariamente y por triplicado hasta que los frutos alcanzaron una madurez de consumo. Se obtuvo el ángulo de tono (Hue) y pureza (Croma) (Ecuación 7 y 8) (Talens-Oliag, 2017).

$$\text{Hue} = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (7)$$

$$\text{croma} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (8)$$

3.2.3.4. Acidez titulable

Se utilizaron 60 mL de agua destilada y se vertieron en una licuadora junto con 20 g de pulpa de aguacate de manera que se tuviera una solución de pulpa de aguacate-agua destilada en relación 1:3, (Maftoonazad y Ramaswamy, 2008). Se filtró la solución con papel filtro y se tituló la solución con NaOH 0.1 N y utilizando fenolftaleína como indicador. Las mediciones se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como % de ácido oleico.

3.2.3.5. Sólidos solubles totales

Se utilizó la mezcla obtenida para acidez titulable, posteriormente se realizó la medición usando un refractómetro digital portátil HANNA® (HI96801, Italia) con escala de 0-85 °Bx. Las mediciones se realizaron por triplicado y el resultado se expresó en ° Brix.

3.2.4. Análisis estadístico descriptivo

Cada una de las variables cuantificadas se consideraron como series de tiempo. La velocidad de respiración (RR) fue la variable de salida y las variables de temperatura (TEMP), humedad relativa (HR) e iluminación (LUM) fueron consideradas variables de entrada. Se realizó un análisis preliminar de cada una de las series de tiempo para observar su comportamiento.

3.2.5. Modelado ARIMA

El procedimiento del modelado para cada una de las series de tiempo se realizó con la metodología de Box *et al.* (2015), basada en tres pasos básicos: 1) identificación del modelo, 2) estimación de parámetros y 3) verificación diagnóstica del modelo.

La etapa de identificación del modelo implica verificar la estacionariedad, es decir, que la media, la varianza y la autocorrelación permanezcan constantes a lo largo del tiempo (Yuan *et al.*, 2016). Este es un requisito necesario para la construcción de los modelos ARIMA. La forma más sencilla de hacer una serie estacionaria es aplicando una primera diferenciación (Mishra *et al.*, 2021). Esta diferenciación implica una resta sucesiva de los valores de la serie, por lo que al hacerlo se pierde un valor y se construye una nueva serie (Ecuación 9).

$$\Delta_{yt} = y_t - y_{t-1} \quad (9)$$

donde y_t son los valores de la serie.

Para verificar la estacionariedad se realizó la prueba de raíz unitaria de Dickey-Fuller aumentada (ADF). La función de autocorrelación (ACF) y la función de autocorrelación parcial (PACF) se tomaron como referencia para identificar el orden de los modelos (p, q). Se evaluó la significancia de los parámetros de los modelos candidatos empleando el método de máxima verosimilitud. El Criterio de

Información de Akaike (AIC) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC) de los modelos candidatos se compararon entre sí para identificar el modelo óptimo y más parsimonioso. Para probar la no correlación de los residuos del modelo final, se empleó la prueba Q de Ljung-Box y las pruebas de autocorrelación (ACF y PACF) (Box *et al.*, 2015).

3.2.6. Modelado ARIMAX

Para detectar la relación que existe entre las variables de salida y la variable de entrada se utilizó la función de relación cruzada (CCF), la cual es una técnica simple y eficiente para detectar la existencia de un cierto desfase temporal entre dos series de tiempo (Yang *et al.*, 2017).

Se empleó también la prueba de causalidad de Granger, que es un método popular para determinar la influencia causal entre procesos estocásticos (Barnett y Seth, 2015). Esta prueba considera cambios en la propia variable además de explorar la interrelación entre éstas, evitando así una pseudocorrelación existente entre dichas variables (Zhang *et al.*, 2022). La prueba contrasta la hipótesis nula: La variable 1 no causa a la manera de Granger a la variable 2, rechazando la hipótesis con valores de $p < 0.05$. Se dice que una variable X causa a la manera de Granger a una variable Y si el pasado de X contiene información que ayuda a predecir el futuro de Y, además de la información que ya existe en el pasado de Y (Barnett y Seth, 2014).

La identificación de los modelos ARIMAX se realizó a partir de la serie preblanqueada de la variable de salida RR. El preblanqueamiento es una técnica que ayuda a identificar qué retraso de la variable independiente afecta a la variable dependiente (Hossain *et al.*, 2021). Cada una de las variables de entrada (TEMP, HR y LUM) se incorporaron la variable de salida RR como covariables y se usaron las funciones de autocorrelación ACF y PACF para identificar los modelos que presentaron ruido blanco. La significancia de cada uno de los parámetros del modelo se evaluó con el método de máxima verosimilitud. Se verificaron los residuos del modelo con las pruebas de autocorrelación (ACF,

PACF) y finalmente se cuantificó la ganancia (efecto) de los modelos de función de transferencia a partir de los coeficientes del modelo ARIMAX multivariado obtenido.

3.2.7. Análisis estadístico

El modelado de las series de tiempo se realizó utilizando PROC ARIMA del software Statistical Analysis System para Windows versión 9.4 (SAS Institute Inc., 2018) y la prueba de causalidad de Granger se realizó en el software estadístico R versión 4.1.3 integrado en la Plataforma de RStudio (RStudio, PBC, Inc. Boston, MA. USA).

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Velocidad de respiración

La media registrada de la velocidad de respiración fue de 71.52 mL kg⁻¹ h⁻¹ y varió de 34.17 a 125.34 mL kg⁻¹ h⁻¹. García et al. (2022) obtuvieron valores entre 135 a 150 mg kg h, que equivalen a 68.5 y 76.14 mL kg⁻¹ h⁻¹ en un periodo de 7 días a 25 °C y 44 % de humedad relativa. Maftoonazad y Ramaswamy (2005) registraron valores más altos que oscilaron entre 120 a 160 mL kg⁻¹ h⁻¹ en los días 0 y 6 de almacenamiento respectivamente. Por otro lado, Tesfay *et al.* (2017) obtuvieron valores de 160 y 200 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ equivalentes a 81.9 y 101.5 mL kg⁻¹ h⁻¹ a 21 ± 1 °C. Los valores obtenidos de respiración (> 60 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) en esta investigación reafirman la perecibilidad del fruto de aguacate (Kader, 2011).

3.3.2. Análisis preliminar de las series de tiempo

Se obtuvieron 7730 valores de las variables de estudio en el sistema de medición de respiración de flujo continuo. El análisis descriptivo (Cuadro 1) contempló el

cálculo de los valores mínimos y máximos, la media y el error estándar de la variable de salida (RR) y de las variables de entrada (TEMP, HR y LUM).

Cuadro 1. Parámetros estadísticos de las series de tiempo de entrada y salida.

Serie de tiempo	Min	Max	Media	Error estándar
Velocidad de respiración ($\text{mL kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	34.17	125.36	71.53	0.33
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	21.99	24.24	23.28	0.01
Humedad relativa (%)	32.21	41.80	35.14	0.02
Iluminación (lux)	4.31	697.90	163.91	2.41

Se registró una media de 23.28°C y 35.14% de humedad relativa en el interior de los recipientes herméticos. La serie de tiempo LUM registró un valor mínimo de 4.31 y un máximo de 697.90 lux, reflejando así la diferencia entre los días y las noches.

El análisis preliminar de la serie de tiempo original de interés (RR) permitió observar una tendencia positiva en el tiempo y una variabilidad de los datos en torno a la media (Figura 3), por lo que la serie original no cumple con el criterio de estacionariedad. Debido a este comportamiento se aplicó una transformación logarítmica y una primera diferencia ($d=1$) (Figura 4) con lo cual la tendencia se elimina y la media se aproxima a 0.

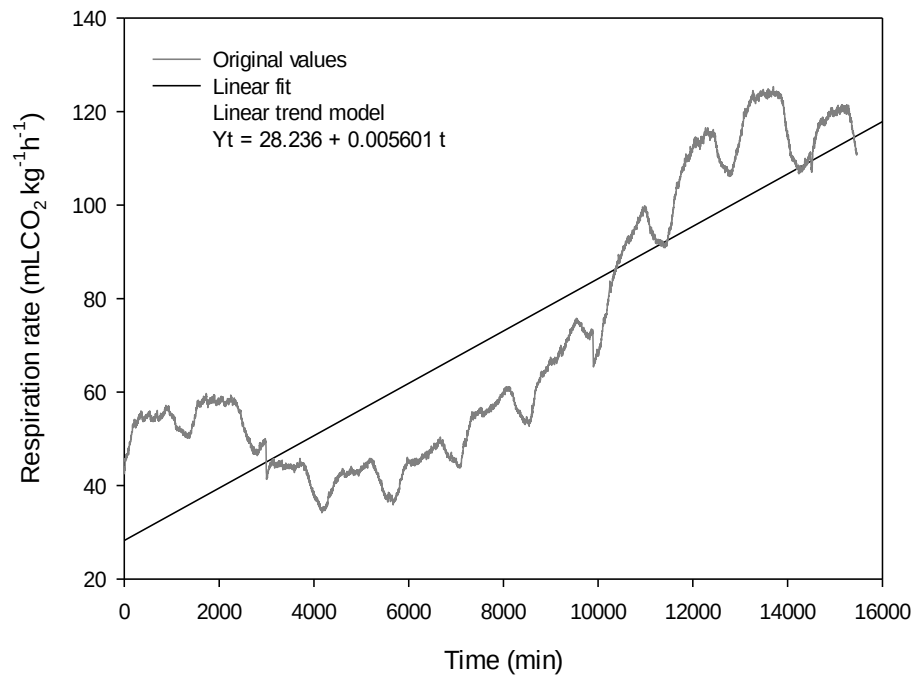


Figura 3. Serie original de la velocidad de respiración de los frutos de aguacate 'Hass'.

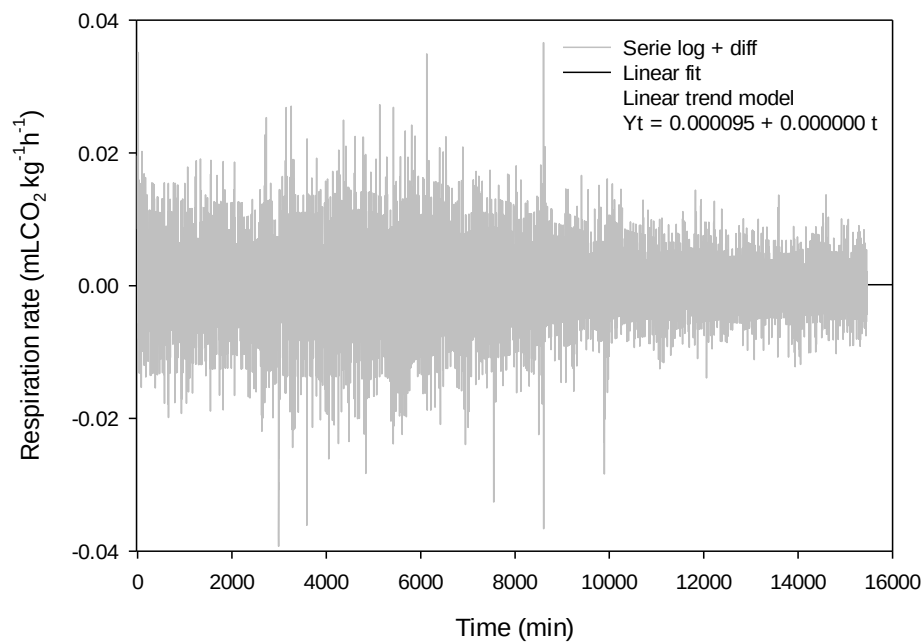


Figura 4. Serie en logaritmo y con primera diferencia de la velocidad de respiración de los frutos de aguacate 'Hass'.

3.3.3. Modelado ARIMA

El Cuadro 2 muestra los estimadores de los parámetros obtenidos de los componentes autorregresivos (AR) y de las medias móviles (MA) identificados para cada serie de tiempo. Se indica el error estándar de las series de tiempo para cada variable y la significancia del estadístico t-Student. Se muestran también los valores de significancia ($p < 0.05$) de la prueba de raíz unitaria de Dickey-Fuller aumentada (ADF) de estacionariedad para los modelos ARIMA óptimos de cada una de las series de tiempo evaluadas. Por último, se muestra la significancia de la prueba de Ljung-Box ($p > 0.05$), que evalúa la no correlación de los residuos del modelo final.

A partir de los coeficientes obtenidos de los componentes AR y MA de los modelos ARIMA finales, se obtienen las ecuaciones de los modelos matemáticos. Dichas ecuaciones se muestran en el Cuadro 3. Las series de tiempo de entrada TEMP, HR y LUM, al igual que la serie de salida RR no cumplieron el requisito de estacionariedad, por lo que todas las series originales presentan una integración de orden 1 ($d=1$) para estabilizar la media y la varianza.

Cuadro 2. Estimadores de los modelos ARIMA ajustados para las series de tiempo de entrada y la serie de tiempo de salida.

Serie	Parámetro	Estimador	Error estándar	t value	p-value	ADF	Ljung-Box
RR	AR (1)	0.9887	0.0037	265.6	< 0.0001	0.01	0.843
	MA (1)	1.2893	0.0117	109.7	< 0.0001		
	MA (2)	- 0.1503	0.0185	- 8.1	< 0.0001		
	MA (3)	- 0.1564	0.0113	- 13.8	< 0.0001		
TEMP	AR (1)	1.2975	0.0376	34.5	< 0.0001	0.01	0.924
	AR (2)	- 0.2057	0.0267	- 7.7	< 0.0001		
	AR (3)	- 0.0948	0.0202	- 4.5	< 0.0001		
	MA (1)	1.6636	0.0351	47.4	< 0.0001		
	MA (2)	- 0.6824	0.0341	- 20.0	< 0.0001		

HR	AR (1)	0.6999	0.0154	45.6	< 0.0001		
	MA (1)	0.2081	0.0181	11.5	< 0.0001	0.01	0.981
	MA (2)	- 0.1456	0.0141	- 10.4	< 0.0001		
LUM	AR (1)	0.9732	0.0057	171.2	< 0.0001		
	MA (1)	1.7356	0.0083	208.6	< 0.0001	0.01	0.450
	MA (2)	- 0.7539	0.0077	- 98.2	< 0.0001		

Con la serie diferenciada, el modelo obtenido es un ARIMA (0,1,0,). Los parámetros del modelo para la serie de interés RR se identificaron a partir del análisis visual de picos significativos ($p < 0.05$) en las funciones de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial PACF (Figura 5a) de la serie transformada en logaritmo y diferenciada.

El parámetro AR se incluye si ACF presenta picos significativos, por otro lado, se incluyen parámetros MA si PACF presenta picos significativos (Box *et al.*, 2015). De manera gráfica se observa que ambas funciones de la serie transformada muestra picos significativos en los primeros retrasos, por lo que es necesario incluir dos o más procesos AR y MA en el modelo final correspondiente a la serie de tiempo de entrada RR.

Los parámetros obtenidos de los componentes autorregresivos (AR) y de las medias móviles (MA) identificados para cada serie de tiempo son todos significativos ($p < 0.5$). Otra forma de evaluar la viabilidad de los modelos es observando su valor t. Aquellos parámetros cuyo valor absoluto de t es mayor que 2 se incluyen en el modelo (Box *et al.*, 2015). Se observa que los valores absolutos del valor t de todos los modelos están por encima de este valor. La media, con valores muy cercanos a 0 no fue significativa, por lo que no se incluyó en el modelo.

Cuadro 3. Modelos ARIMA de las series de tiempo de entrada y la serie de tiempo de salida.

Serie	Tipo de modelo	Modelo ARIMA
RR	ARIMA (1,1,3)	$\ln RR_t = 0.9887 RR_{t-1} + 1.2893 \varepsilon_{t-1} - 0.1503 \varepsilon_{t-2} - 0.1564 \varepsilon_{t-3}$
TEMP	ARIMA (3,1,2)	$\ln TEMP_t = 1.2975 TEMP_{t-1} - 0.2057 TEMP_{t-2} - 0.0948 TEMP_{t-3} + 1.6636 \varepsilon_{t-1} - 0.6824 \varepsilon_{t-2}$
HR	ARIMA (1,1,2)	$\ln HR_t = 0.6999 HR_{t-1} + 0.2081 \varepsilon_{t-1} - 0.1456 \varepsilon_{t-2}$
LUM	ARIMA (1,1,2)	$\ln LUM_t = 0.9732 LUM_{t-1} + 1.7356 \varepsilon_{t-1} - 0.7539 \varepsilon_{t-2}$

El modelo óptimo que describió de manera adecuada el comportamiento de la serie de salida RR se ajustó a un ARIMA (1,1,3), es decir, incluye 1 componente autorregresivo y 3 componentes de media móvil con una diferencia. Es conveniente mencionar que cualquier modificación en la serie de tiempo original implica realizar un nuevo modelo matemático, lo que implica repetir la metodología de construcción de modelos ARIMA. Las series de entrada TEMP, HR y LUM se ajustaron a los modelos ARIMA (3,1,2), ARIMA (1,1,2) y ARIMA (1,1,2) respectivamente, todos estos modelos seleccionados cumplieron con el menor valor en los criterios de selección del AIC y BIC.

3.3.4. Evaluación de residuales

Las funciones ACF y PACF del modelo ARIMA final de la serie velocidad de respiración RR (Figura 5b) no presentaron picos significativos en sus residuales, es decir, son ruido blanco, por lo que se descartó la presencia de autocorrelación entre los mismos. La prueba ADF (Cuadro 4) muestra valores significativos ($p < 0.05$) para los modelos ARIMA finales, con lo que se rechaza la hipótesis nula (la serie es no estacionaria, existe raíz unitaria). La prueba de Ljung-Box dio como resultado valores de p mayores al 5 %, lo cual es prueba de la ausencia de autocorrelación en los residuales de todos los modelos ARIMA óptimos seleccionados.

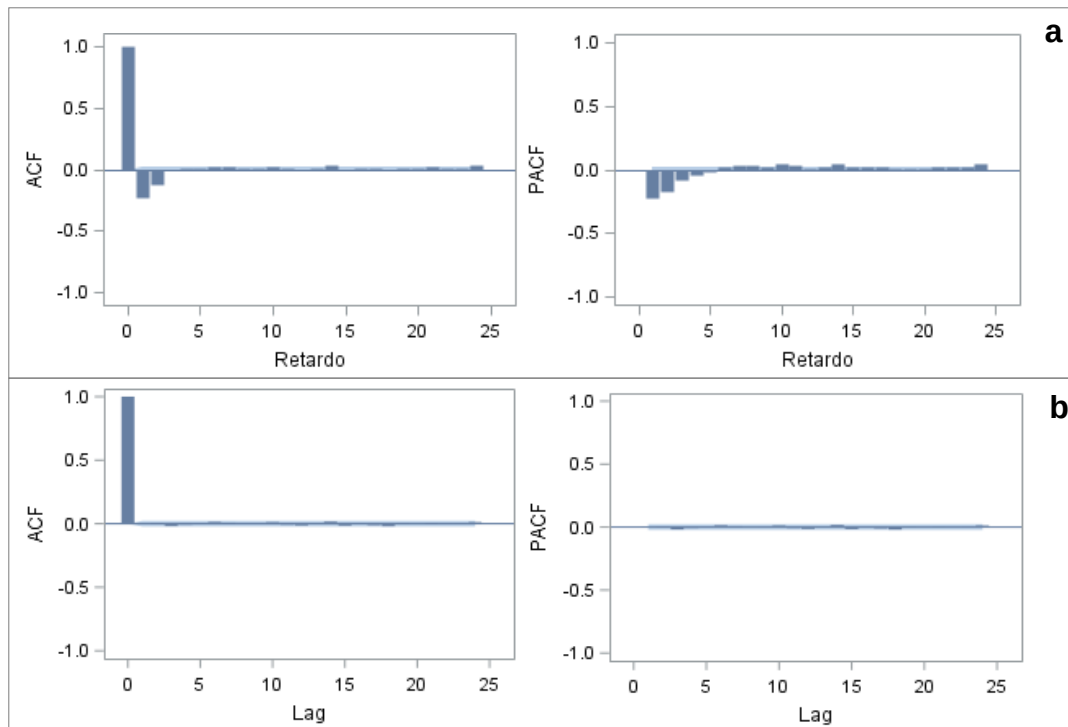


Figura 5. Diagnóstico de correlación de residuales de la serie transformada (a) y del modelo ARIMA (1,1,3) (b) para la velocidad de respiración en frutos de aguacate ‘Hass’.

3.3.5. Ajuste de los modelos

En las Figuras 6, 7, 8 y 9 se observa el ajuste de los modelos ARIMA óptimos a los datos originales y el comportamiento de sus residuales. Los residuales del modelo de los modelos ARIMA mostrados muestran valores muy bajos, es decir, la diferencia entre los datos experimentales observados y los ajustados es mínima, por lo que el ajuste es bueno. La serie con un mayor ajuste fue TEMP y HR, seguido de la RR y por último la serie LUM.

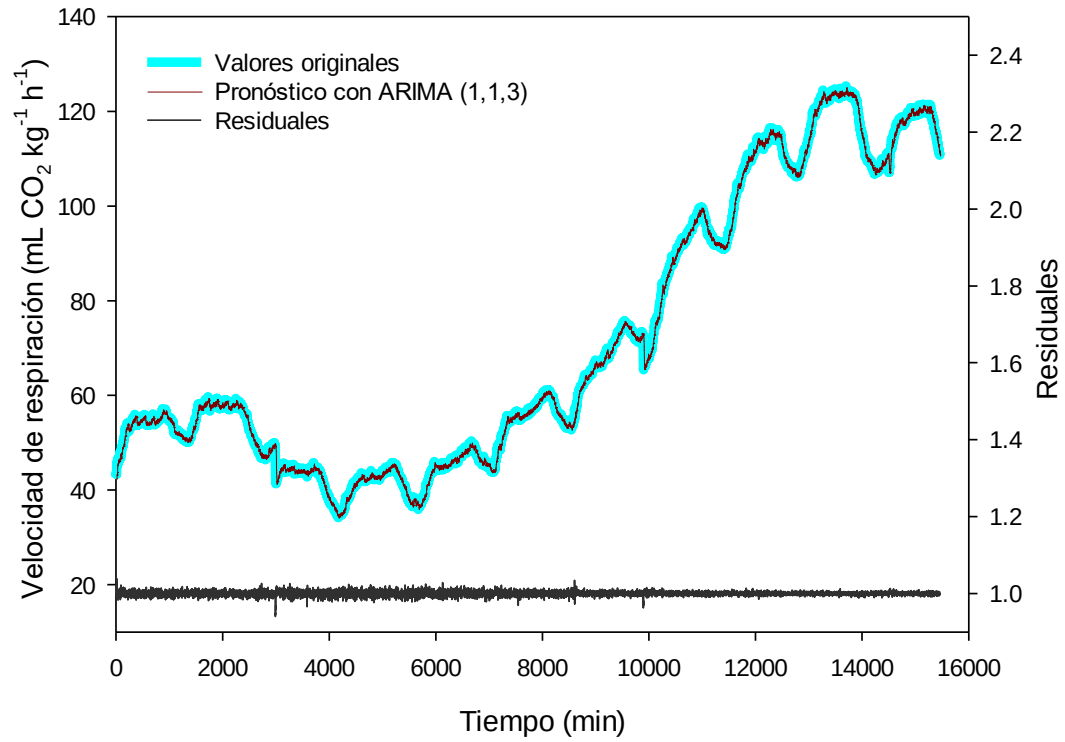


Figura 6. Ajuste del modelo ARIMA de la serie de salida RR.

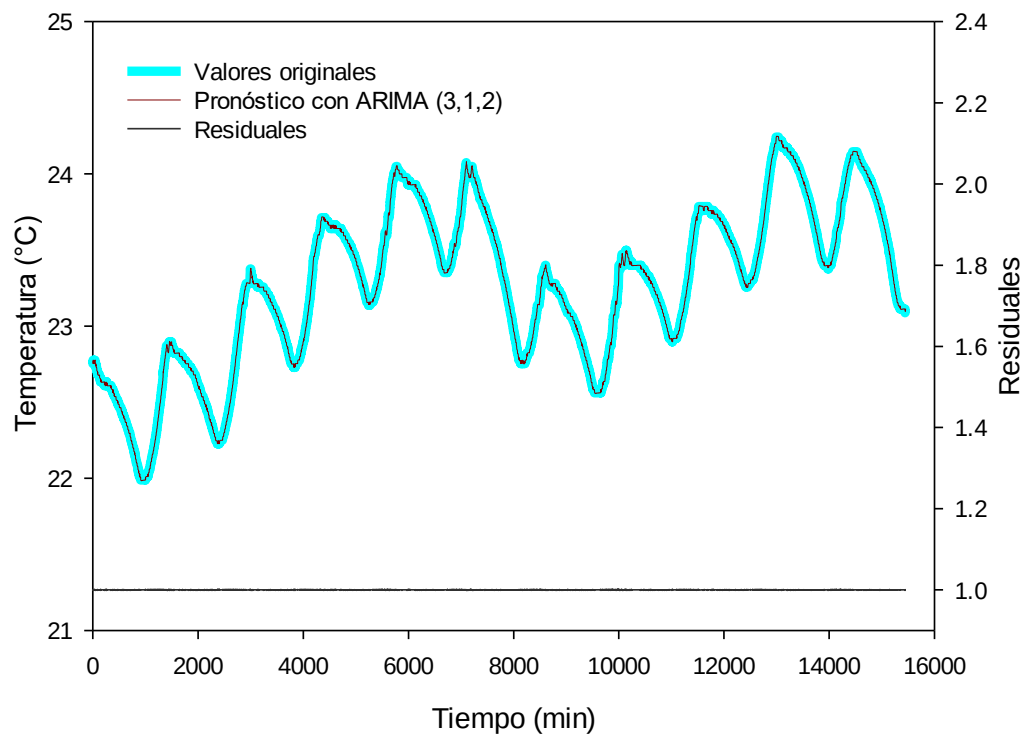


Figura 7. Ajuste del modelo ARIMA de la serie de entrada TEMP.

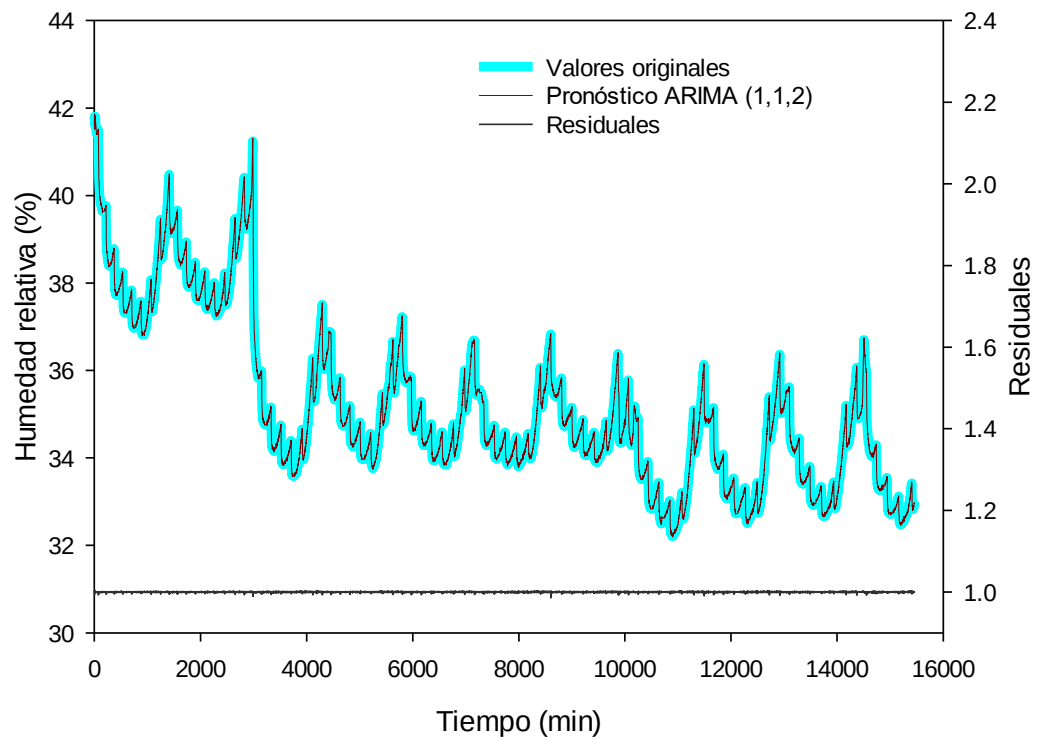


Figura 8. Ajuste del modelo ARIMA de la serie de entrada HR.

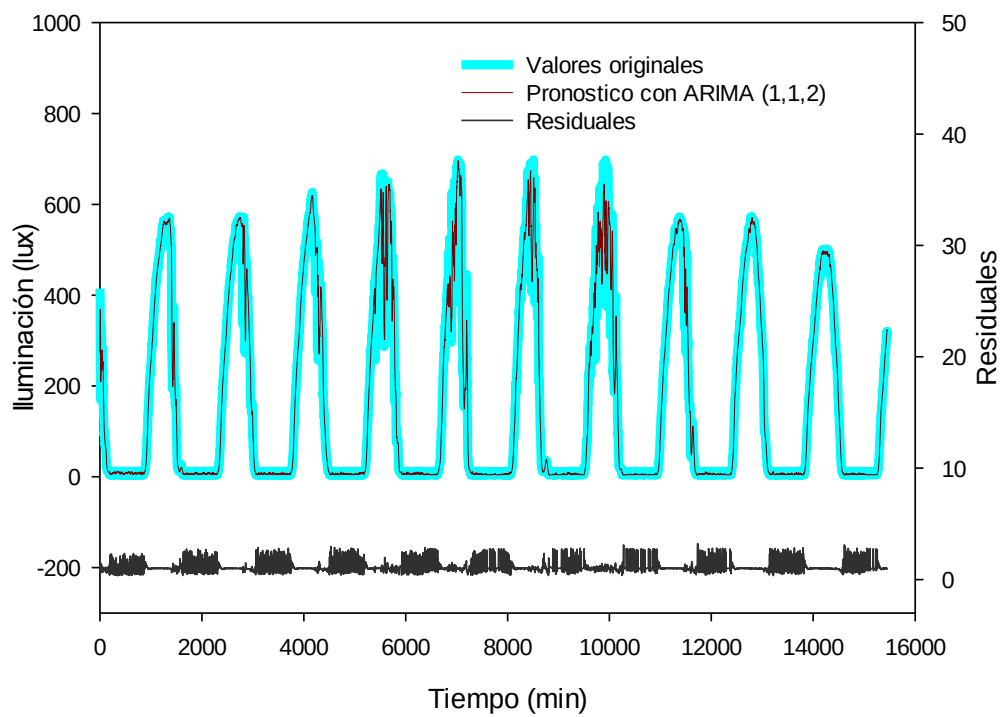


Figura 9. Ajuste del modelo ARIMA de la serie de entrada LUM.

3.3.6. Causalidad

Se observó la existencia de una relación desfasada entre las variables exógenas con la velocidad de respiración a través de la función de correlación cruzada (CCF) (Figura 10). Sin embargo, el uso de la correlación para establecer causalidad no es suficiente y es arriesgado (Sugihara *et al.*, 2012), por lo que la prueba de causalidad de Granger se usó para determinar la existencia efectiva de una relación causal entre las variables de entrada y la variable de salida.

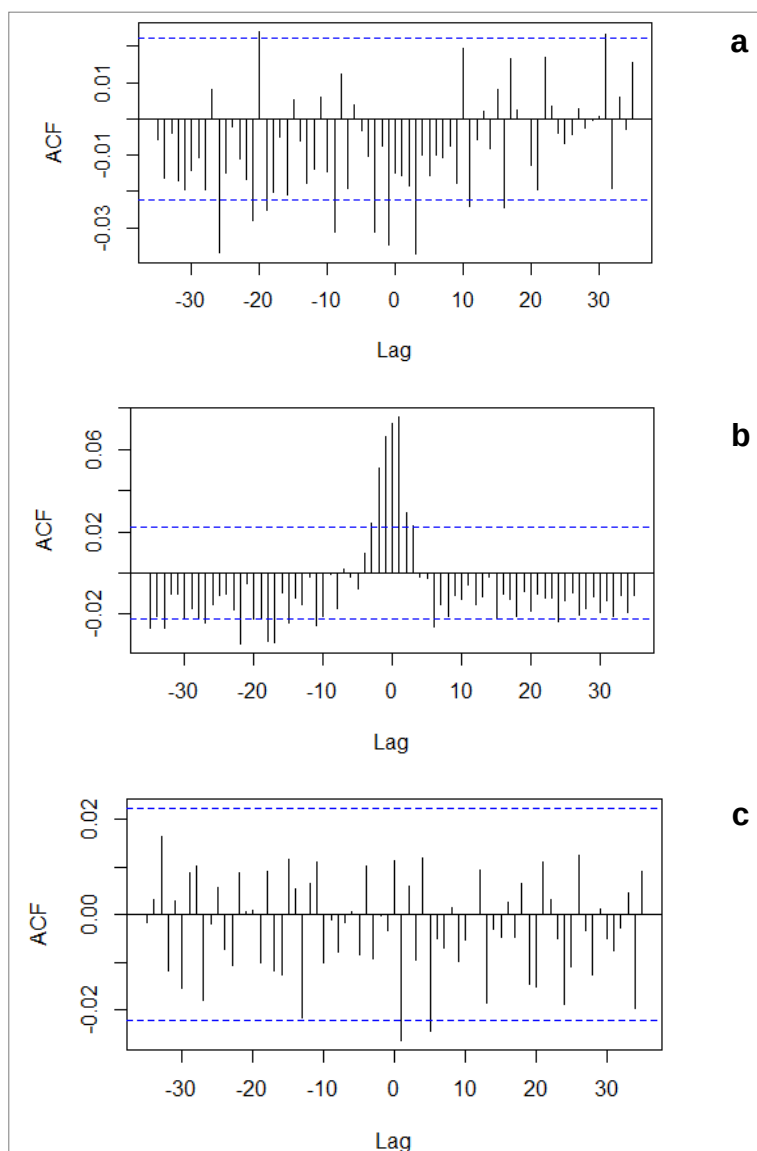


Figura 10. Función de correlación cruzada de a) velocidad de velocidad de respiración vs temperatura, b) velocidad de velocidad de respiración vs humedad relativa y c) velocidad de respiración vs iluminación.

La relación causal por pares entre la serie de salida RR y las series de entrada TEMP, HR y LUM se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Prueba de causalidad de Granger.

Hipótesis nula	P(>F)
TEMP no causa a la manera de Granger a RR	0.0007012
H Rno causa a la manera de Granger a RR	< 2.2e-16
LUM no causa a la manera de Granger a RR	0.04441

Los valores p de la prueba de causalidad de Granger fueron inferiores al 5 %, lo cual indica una relación directa de causa y efecto entre las variables de entrada y la variable de salida RR. Estos resultados confirman que es posible integrar las variables TEMP, HR y LUM para predecir la velocidad de respiración en frutos de aguacate ‘Hass’.

3.3.7. Modelado ARIMAX

A partir del modelo preblanqueado de la serie de salida RR, se incorporaron las variables de entrada TEMP, HR y LUM primero de manera individual como covariables y posteriormente de manera conjunta con la finalidad de detectar el efecto individual de cada una de las variables de entrada y su efecto multivariado. A partir de este procedimiento surgen nuevos modelos (ARIMAX). La significancia de los parámetros de cada uno de estos modelos ARIMAX encontrados se detalla en el Cuadro 5. Todos y cada uno de los modelos obtenidos cumplieron el requisito de estacionariedad, además, todos los parámetros obtenidos conservan su significancia con la adición de las variables de entrada. De igual manera, los valores t son mayores que 2, por lo que con ello se confirma la pertinencia de la incorporación de cada una de las variables de manera individual, así como en su conjunto. La media al igual que en los modelos ARIMA no se contempla para ninguno de los modelos encontrados debido a que

la serie fue diferenciada y estos valores cercanos a 0 no fueron significativos en ninguno de los casos. Las ecuaciones obtenidas a partir de los coeficientes de estos parámetros se detallan en el Cuadro 6.

Cuadro 5. Estimadores de los parámetros de los modelos ARIMAX (1,1,3) de la serie de tiempo de salida y la serie de tiempo de entrada.

Serie	Parámetros	Estimador	Error estándar	t-value	p-value
RR	AR (1)	0.9888	0.0038	258.1	< 0.0001
	MA (1)	1.2960	0.0118	110.2	< 0.0001
	MA (2)	- 0.1516	0.0185	- 8.2	< 0.0001
	MA (3)	- 0.1611	0.0113	-14.2	< 0.0001
TEMP	NUM	- 0.8899	0.1927	- 4.6	< 0.0001
RR	AR (1)	0.9899	0.0032	306.5	< 0.0001
	MA (1)	1.2992	0.0116	111.6	< 0.0001
	MA (2)	- 0.1479	0.0186	- 7.9	< 0.0001
	MA (3)	- 0.1683	0.0114	- 14.8	< 0.0001
HR	NUM	0.2496	0.0360	6.9	< 0.0001
RR	AR (1)	0.9884	0.0038	258.7	< 0.0001
	MA (1)	1.2896	0.0118	109.5	< 0.0001
	MA (2)	- 0.1506	0.0185	- 8.1	< 0.0001
	MA (3)	- 0.1565	0.0113	- 13.8	< 0.0001
LUM	NUM	- 0.0004	0.0002	- 2.3	0.0233
RR	AR (1)	- 0.6516	0.0543	- 12.0	< 0.0001
	MA (1)	0.4272	0.0222	19.2	< 0.0001
	MA (2)	0.1328	0.0122	10.8	< 0.0001
	MA (3)	- 0.9589	0.0539	- 17.8	< 0.0001
TEMP	NUM1	- 1.0774	0.1743	- 6.2	< 0.0001
HR	NUM2	0.4169	0.0365	11.4	< 0.0001
LUM	NUM3	- 0.0006	0.0002	- 3.2	0.0013

Cuadro 6. Modelos ARIMAX (1,1,3) del efecto univariado y multivariado de las series de salida sobre la serie de entrada en frutos de aguacate ‘Hass’.

Modelos ARIMAX (1,1,3)	
Efecto univariado	
RR explicado por TEMP	$\ln RR_t = 0.988 RR_{t-1} + 1.296 \varepsilon_{t-1} - 0.1516 \varepsilon_{t-2} - 0.1611 \varepsilon_{t-3} - 0.8899 TEMP_t$
RR explicado por HR	$\ln RR_t = 0.9899 RR_{t-1} + 1.2992 \varepsilon_{t-1} - 0.1479 \varepsilon_{t-2} - 0.1683 \varepsilon_{t-3} + 0.2496 HR_t$
HR explicado por LUM	$\ln RR_t = 0.9884 RR_{t-1} + 1.2896 \varepsilon_{t-1} - 0.1506 \varepsilon_{t-2} - 0.1565 \varepsilon_{t-3} - 0.0004 LUM_t$
Efecto multivariado	
RR explicado por TEMP, HR, LUM	$\ln RR_t = -0.6516 RR_{t-1} + 0.4272 \varepsilon_{t-1} + 0.1328 \varepsilon_{t-2} - 0.9589 \varepsilon_{t-3} - 1.0774 TEMP_t + 0.4169 HR_t - 0.0006 LUM_t$

3.3.8. Ganancia de la función de transferencia

El efecto univariado y multivariado (ganancia) de las variables de entrada encontrados por el modelo ARIMAX (1,1,3) se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Ganancia de los modelos de función de transferencia de la velocidad de respiración en frutos de aguacate ‘Hass’.

Tipo de modelo	Ganancia
Efecto de TEMP sobre RR	0.34
Efecto de HR sobre RR	1.52
Efecto de LUM sobre RR	0.99

Un efecto contemporáneo se observó entre la variable HR y RR, es decir, un cambio en el tiempo de HR implica un cambio simultáneo en la velocidad de respiración (Figura 10). En cambio, las variables TEMP y LUM mostraron un

efecto retardado. El impacto detectado en las funciones de transferencia indica que, para cada unidad de aumento de T, HR y LUM la respiración aumenta en 0.34, 1.52 y 0.99 mL kg⁻¹ h⁻¹, respectivamente. En términos de porcentaje estos valores implican un aumento del 1.96 % debido al cambio de temperatura, un 6.37 % debido al cambio en la humedad relativa y 3.79 % debido al cambio en la iluminación sobre la media en la velocidad de respiración de los frutos de aguacate 'Hass'.

3.3.9. Variables de calidad

La velocidad de respiración la cual fue la variable de interés en este estudio fue complementada con la medición de variables físicas y químicas de pérdida de peso (Figura 11), firmeza (Figura 12), color (Figura 13), sólidos solubles totales (Figura 14) y acidez titulable (Figura 15). Los frutos utilizados para dichas pruebas fueron almacenados a condiciones de laboratorio de 20 ± 2 °C y 30 – 50 % de humedad relativa, mientras que los frutos evaluados para actividad respiratoria estuvieron en condiciones de 24.2 ± 2 °C y 32-42 % HR, que fueron las condiciones sostenidas en el interior de los recipientes herméticos. Dichas condiciones varían tanto en temperatura como en % de humedad relativa pero estas diferencias son mínimas y que no tuvieron efecto en la madurez de consumo de los frutos ya que registraron una maduración similar, es decir, ambos alcanzaron su madurez de consumo en el día 11 de almacenamiento.

La maduración representa una suma de los procesos fisiológicos y bioquímicos, incluidos el desverdecimiento y la acumulación de pigmentos, los cambios de textura asociados con el metabolismo de la pared celular y la variación de la turgencia celular que conduce al ablandamiento y los cambios metabólicos relacionados con el sabor y la composición de nutrientes, generalmente asociada con la acumulación de azúcares, ácidos y volátiles que culminan en una diversa gama de sabores y olores, que varían entre especies (Klee y Giovannoni, 2011). Siendo un fruto climatérico, el aguacate experimenta un pico climatérico antes de la maduración donde la respiración celular es alta (García *et al.*, 2022). Los

resultados de velocidad de respiración obtenidos en esta investigación muestran el comportamiento de frutos climatéricos, donde la velocidad de respiración registró un aumento progresivo a partir del día 5 y alcanzando un máximo de $125.34 \text{ mL kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ en el día 10 y que coincide con el valor máximo registrado, una vez alcanzado este valor máximo la velocidad de respiración disminuye para el día 11, tiempo en el cual se alcanzó la madurez de consumo en los frutos de aguacate 'Hass' (Figura 3). Se considera que el etileno y el climaterio respiratorio desencadenan los eventos que conducen a la maduración y el pico climatérico que puede durar de 2 a 4 días en aguacates (Lallum *et al.*, 2004). Este climaterio inicia cuando el fruto alcanza su mayor tamaño (madurez fisiológica), evidenciándose en su aumento en la velocidad de respiración y de producción de etileno (Zapata *et al.*, 2014). Toivonen (2016) señala que el aumento y los picos tanto en la velocidad de respiración como en la producción de etileno en su conjunto es lo que se denomina climaterio. Podría decirse entonces que los frutos de aguacate 'Hass' evaluados alcanzaron el climaterio respiratorio en el día 10 para después disminuir en el día 11, sin embargo, esto no podría afirmarse debido a que la variable etileno no fue determinada y como ya se discutió anteriormente, el climaterio en su conjunto está determinado por la respiración y la producción de etileno.

La pérdida de agua de los frutos está asociada directamente con la pérdida de peso (Magaña-Benítez *et al.*, 2013), de acuerdo con Bower y Papli (2006) pérdidas de peso mayores al 6 % comprometen la calidad de frutos de aguacate, estas condiciones se mantuvieron solo hasta el día 4 hasta alcanzar pérdidas del 13 % para la maduración, las condiciones de baja humedad relativa favorecieron esta pérdida debida principalmente a la transpiración de los frutos y en menor medida a la respiración, además componentes volátiles y aquellos solubles en agua, pueden ser liberados al entorno, durante la deshidratación (Saucedo *et al.*, 2009). Las células de los frutos son cada vez más permeables a medida que maduran, debido a que la integridad de los compuestos que conforman la pared celular se pierde por acción del etileno que activa enzimas hidrolíticas como la poligalacturonasa y celulasa y que son responsables de romper los enlaces que

conforman a los polisacáridos de la pared celular del fruto (Payasi *et al.*, 2009 y Pedreschi *et al.*, 2019), ello implica una disminución en la firmeza en el transcurso del tiempo, como se observa en la Figura 12, la firmeza de los frutos de aguacate 'Hass' disminuyó de 60 hasta 11 N para el día 11. Rosas-Flores *et al.* (2020) encontró que frutos de aguacate 'Hass' alcanzaron su maduración cuando alcanzaron de 10-11 N, por otro lado, Márquez *et al.* (2014) y Vallejo-Pérez *et al.* (2015) reportan una firmeza de 7-8 y < 5 N en frutos de aguacate 'Hass' en estado de madurez de consumo.

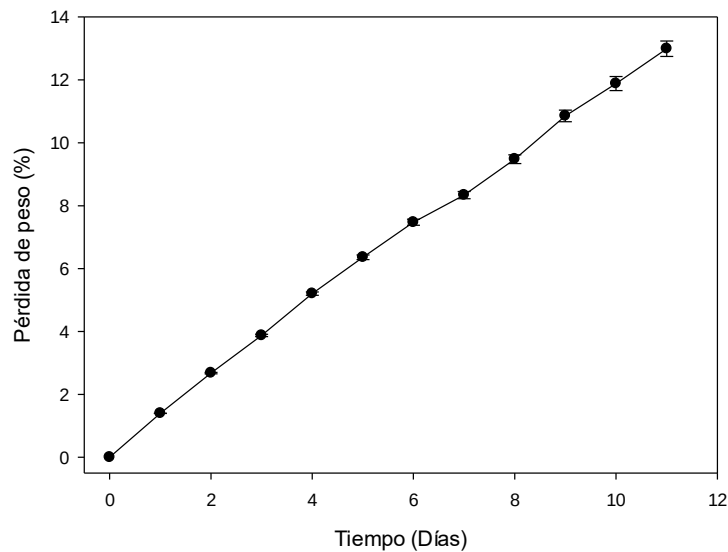


Figura 11. Pérdida de peso de los frutos de aguacate 'Hass'.

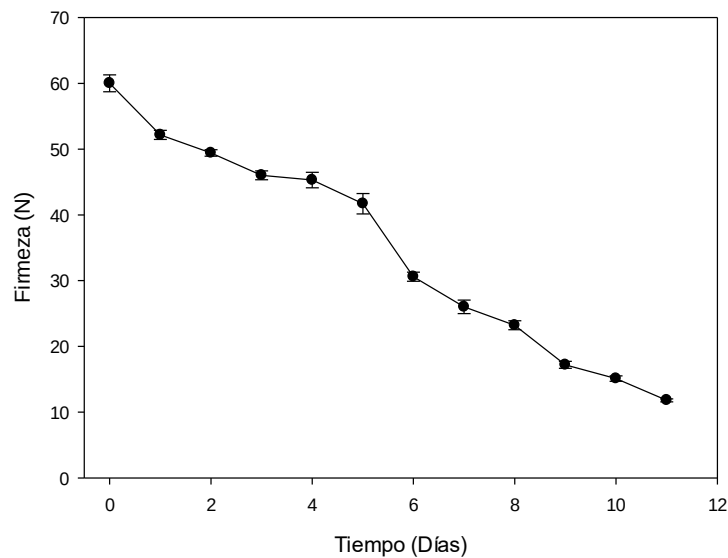


Figura 12. Firmeza de los frutos de aguacate 'Hass'.

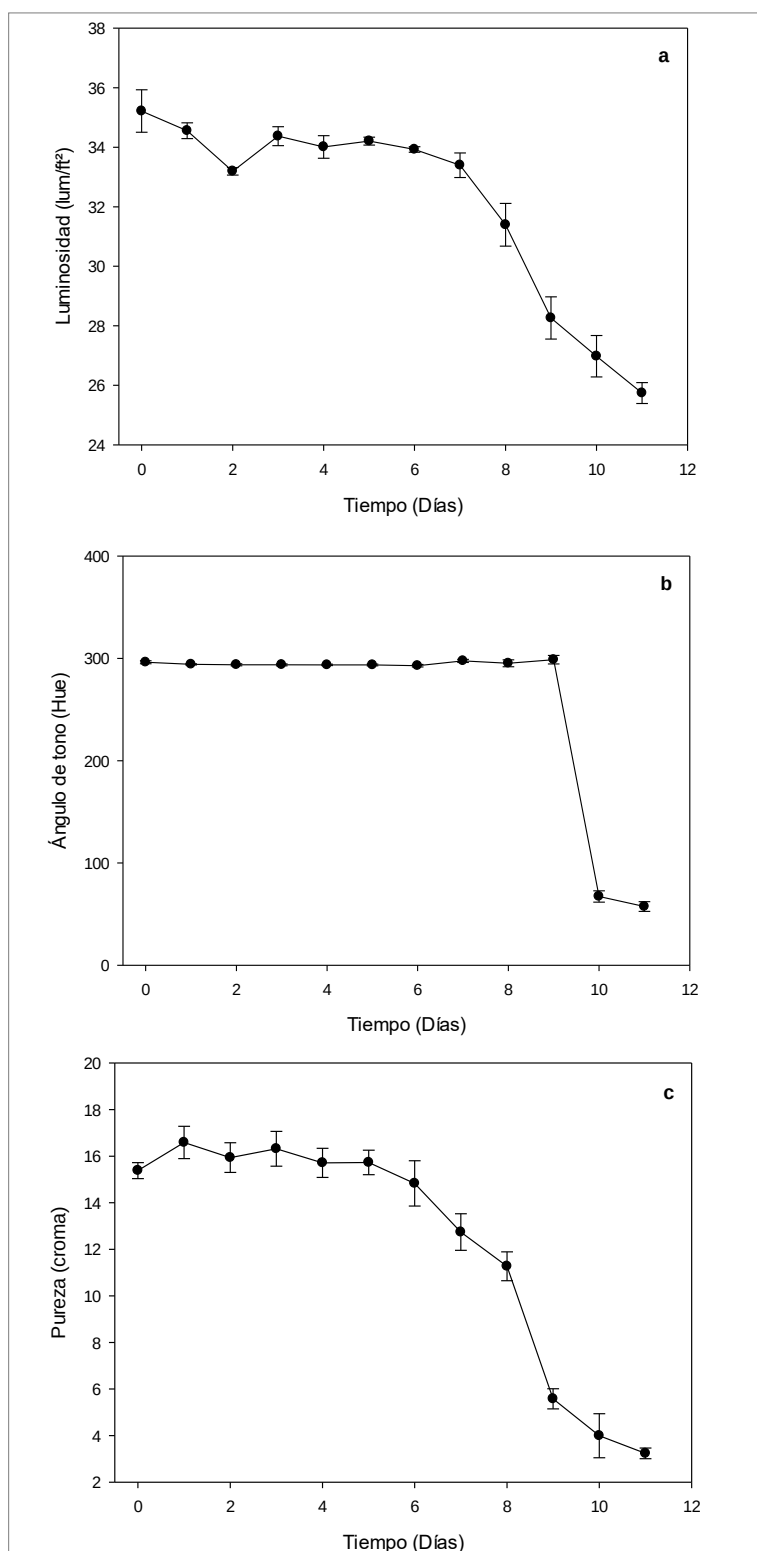


Figura 13. Variables de color, a) Iluminación, b) ángulo de tono (Hue) y c) pureza (croma) de los frutos de aguacate 'Hass'.

El cambio de color está relacionado con la biosíntesis. y degradación de pigmentos, incluyendo clorofilas, carotenoides, flavonoides y betalaínas (Kader y Yahia, 2011) y es sin duda un indicador de maduración importante para el sector industrial (Rosas-Flores *et al.*, 2020). Durante la maduración en los frutos de aguacate 'Hass' se observó una disminución en la iluminación de los frutos con un valor de 36 lum/ft² para el primer día y alcanzando valores de 25 lum/ft² en la maduración (Figura 13a), coincidiendo así con la obtención de un color oscuro, típico del aguacate 'Hass'.

Generalmente el cambio de color en el epicarpio de frutos de aguacate 'Hass' durante la maduración es caracterizada por una disminución del índice de saturación (croma) y del ángulo de tono (Hue) (Cox *et al.*, 2004). En este estudio, las características de coloración coinciden con el comportamiento respiratorio, es decir, a medida que la respiración se incrementa, la iluminación y el valor de Hue y croma decaen (Figura 13), principalmente se observa esta relación con el aumento en la velocidad de respiración en el día 10, en donde la variable Hue sufre un decremento drástico en el cambio en la iluminación y la pureza (croma) este decaimiento se observó para el día 9.

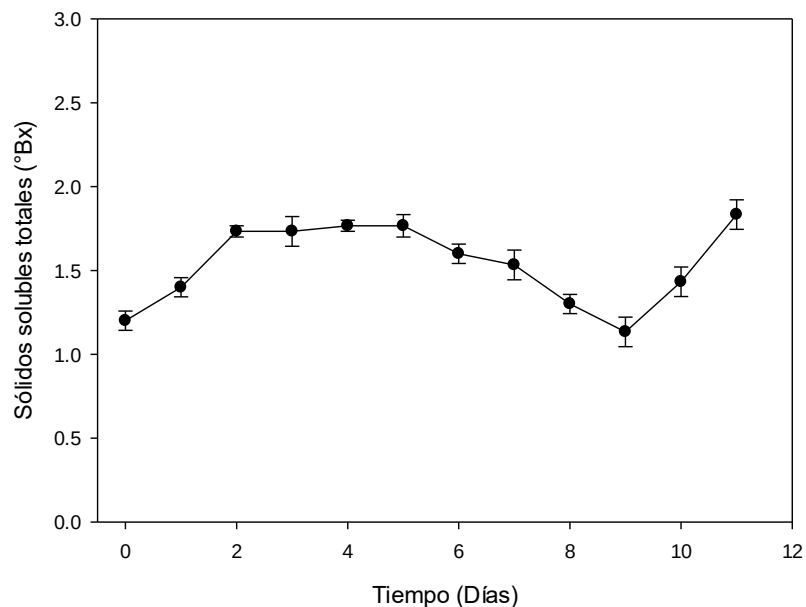


Figura 14. Sólidos solubles totales los frutos de aguacate 'Hass'.

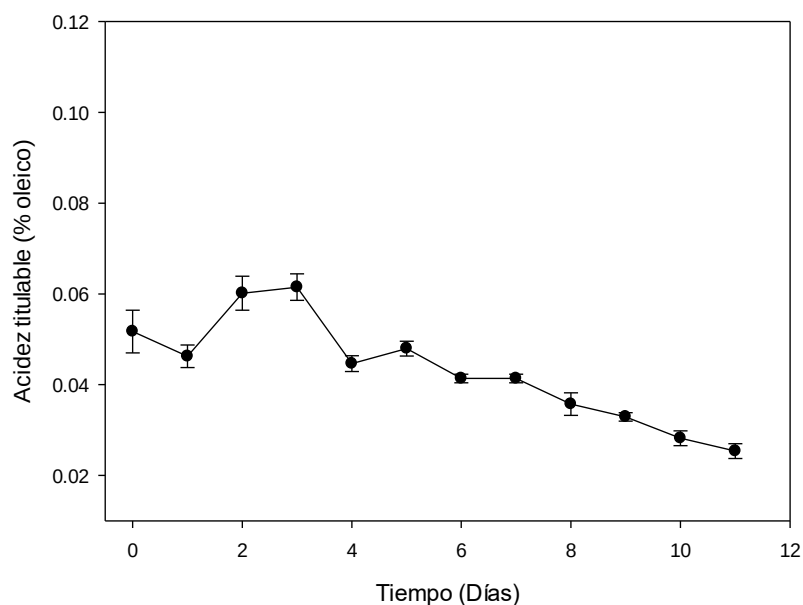


Figura 15. Acidez titulable los frutos de aguacate ‘Hass’.

Por otra parte, los sólidos solubles totales expresados en °Bx y la acidez titulable se muestran en las Figuras 14 y 15. Para la variable sólidos solubles totales se observa un ligero incremento desde el primer día de medición hasta el día 3 y manteniéndose constante en los próximos 3 días para luego registrar una disminución hasta el día 9 y un incremento hasta la maduración con valor de 2 °Brix. Autores como Márquez *et al.* (2014) registran valores similares de entre 2.0° a 2.45 °Brix en estado de madurez de consumo atribuyendo este aumento a la conversión de polisacáridos y ácidos orgánicos en azúcares o ácidos de cadena corta en el proceso de maduración (Taiti *et al.*, 2015). Por el contrario, autores como Benítez *et al.* (2021) y Astudillo y Rodríguez (2018) reportan valores más altos de 4.8 ± 0.98 y de 6.2 ± 1.5 °Brix respectivamente al final de la maduración.

La acidez titulable, por el contrario, presenta una tendencia a la disminución con valores fluctuantes en los primeros 4 días y alcanzando un valor de 0.03 %, estos resultados fueron menores a los reportados por Márquez *et al.* (2014) donde registraron valores de 0.16 % en la maduración, esta disminución es atribuida al consumo de moléculas orgánicas en los diferentes ciclos metabólicos para

proporcionar la energía requerida durante el almacenamiento (Park *et al.*, 2006). En general, el dulzor aumenta (medido como contenido de sólidos solubles o °Brix) y la acidez disminuye (% de acidez titulable) a medida que la fruta madura, y su relación está directamente relacionada con el sabor y la aceptabilidad, y en consecuencia, dicha relación se utiliza como indicador de calidad y de cosecha (Montero-Calderón y Cerdas-Araya, 2012).

3.4. Conclusiones

El efecto de las variables de temperatura, humedad relativa e iluminación sobre la velocidad de respiración en frutos de aguacate 'Hass' fueron modelados adecuadamente utilizando la metodología de Box-Jenkins. La prueba de causalidad de Granger demostró una relación causal entre las variables de entrada y la variable de salida, por lo que dichas variables fueron adecuadas para obtener las funciones de transferencia de los modelos ARIMAX. El impacto detectado en las funciones de transferencia indica que cada una de las variables exógenas tiene un efecto directamente proporcional sobre la velocidad de respiración en proporciones del 1.96, 6.37 y 3.79 % debido a una unidad de incremento en la temperatura, humedad relativa e iluminación respectivamente. El modelado ARIMAX se puede usar con éxito para explicar el comportamiento respiratorio en frutos de aguacate 'Hass' por el efecto de factores externos después de la cosecha. Las variables de pérdida de peso, firmeza, y acidez titulable registraron una tendencia a la disminución mientras que los sólidos solubles totales registraron un aumento durante su proceso de maduración.

3.5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (México) a través de la beca No. 774775 y la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo por medio del proyecto convencional 21022-C-62. Los autores agradecen a la Línea de Bioprocesos Agroalimentarios de la Universidad Autónoma Chapingo y a la Fundación Salvador Sánchez Colín por haber otorgado el material experimental que se utilizó para llevar a cabo este trabajo de investigación, en especial a la Dra. María de la Cruz.

3.6. Literatura citada

- Aguirre-Joya, J. A., Ventura-Sobrevilla, J., Martínez-Vazquez, G., Ruelas-Chacón, X., Rojas, R., Rodríguez-Herrera, R., & Aguilar, C.N. (2017). Effects of a natural bioactive coating on the quality and shelf life prolongation at different storage conditions of avocado (*Persea americana* Mill.) cv. Hass. *Food Packaging and Shelf Life*, 14, 102-107. doi: 10.1016/j.fpsl.2017.09.003.
- Astudillo, C., & Rodríguez, P. (2018). Parámetros fisicoquímicos del aguacate *Persea americana* Mill. cv. Hass (Lauraceae) producido en Antioquia (Colombia) para exportación. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 19 (2), 383-392. doi: 10.21930/rcta.vol19_num2_art:694.
- Barnett, L., & Seth, A. K. (2014). The MVGC multivariate Granger causality toolbox: A new approach to Granger-causal inference. *Journal of Neuroscience Methods*, 223, 50–68. doi: 10.1016/j.jneumeth.2013.10.018.
- Barnett, L., & Seth, A. K. (2015). Granger causality for state-space models. *Physical Review E*, 91 (4), 040101. doi: 10.1103/PhysRevE.91.040101.
- Benítez, J., Sánchez, A., Bolaños, C., Bernal, L., Ochoa-Martínez, C., Vélez, C., & Sandoval, A. (2021). Cambios fisicoquímicos del aguacate Hass durante el almacenamiento frío y la maduración acelerada. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19 (2), 41-56. doi: 10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1490.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). Time Series Analysis: Forecasting and Control. John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey. USA.
- Bower, J. P., & Papli, G. (2006). Effect of fruit coatings and packaging on chilling injury of 'Hass' avocados. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 29, 69-72. Disponible en http://www.avocadosource.com/Journals/SAAGA/SAAGA_2006/saaga_2006_v29_pgs_69-72_bower.pdf

- Caleb, O. J., Mahajan, P. V., Opara, U. L., & Witthuhn, C. R. (2012). Modeling the respiration rates of pomegranate fruit and arils. *Postharvest Biology and Technology*, 64 (1), 49–54. doi: 10.1016/j.postharvbio.2011.09.013.
- Cox, A. K., McGhie, T. K., White, A., & Woolf A. B. (2004). Skin colour and pigment changes during ripening of Hass avocado fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 31 (3), 287-294. doi: 10.1016/j.postharvbio.2003.09.008.
- García, F., Lin, W. J., Mellano, V., & Davidov-Pardo, G. (2022). Effect of biopolymer coatings made of zein nanoparticles and ϵ -polylysine as postharvest treatments on the shelf-life of avocados (*Persea americana* Mill. Cv. Hass). *Journal of Agriculture and Food Research*, 7 (2022), 100260. doi: 10.1016/j.jafr.2021.100260.
- Ho, Q. T., Rogge, S., Verboven, P., Verlinden, B. E., & Nicolaï, B. M. (2016). Stochastic modelling for virtual engineering of controlled atmosphere storage of fruit. *Journal of Food Engineering*, 176, 77–87. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.07.003.
- Hossain, M. S., Ahmed, S., & Uddin, M. J. (2021). Impact of weather on COVID-19 transmission in south Asian countries: an application of the ARIMAX model. *Science of The Total Environment*, 761, 143315. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143315.
- Jalali, A., Linke, M., Geyer, M., & Mahajan, P. V. (2020). Shelf life prediction model for strawberry based on respiration and transpiration processes. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100525. doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100525.
- Kader, A. A., & Yahia, E. M. (2011). Postharvest biology of tropical and subtropical fruits. *Postharvest biology of tropical and subtropical fruits*. Woodhead Publishing, pp. 79-110. doi: 10.1533/9780857093622.79.
- Kassim, A., & Seyoum, W. T. (2020). Influence of postharvest treatments and storage conditions on the quality of Hass avocados. *Heliyon*, 6, e04234. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e04234.

- Klee, H. J., & Giovannoni, J. J. (2011). Genetics and control of tomato fruit ripening and quality attributes. *Annual Review of Genetics* 45, 41–59. doi: 10.1146/annurev-genet-110410-132507.
- Ktenioudaki, A., O'Donnell, C. P., & do Nascimento Nunes, M. C. (2019). Modelling the biochemical and sensory changes of strawberries during storage under diverse relative humidity conditions. *Postharvest Biology and Technology*, 154, 148-158. doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.04.023.
- Lallum, N., Punter, M., Haynes, G., Pidakala, P., & Burdon, J. (2004). Role of water loss in ripening of 'Hass' avocados. *New Zealand Avocado Growers Association Annual Research Report*, 4, 70-79.
- Liplap, P., Vigneault, C., Toivonen, P., Charles, M.T., & Raghavan, G. S. V. (2013). Effect of hyperbaric pressure and temperature on respiration rates and quality attributes of tomato. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 240–248. doi:10.1016/j.postharvbio.2013.07.002.
- Maftoonazad, N., & Ramaswamy, H. S. (2005). Postharvest shelf-life extension of avocados using methyl cellulose-based coating. *LWT - Food Science and Technology*, 38 (6), 617 624. doi: 10.1016/j.lwt.2004.08.007.
- Magaña-Benítez, W., Sauri-Duch, E., Corrales-García, J., & Saucedo-Veloz, C. (2013). Variaciones bioquímicas-fisiológicas y físicas de las frutas de pitahaya (*Hylocereus undatus*) almacenadas en ambiente natural. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 14, (1), 21-30. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81329290007>.
- Márquez, C., Yepes, D., Sanchez. L. & Osorio, J. (2014). Cambios FísicoQuímicos del Aguacate (*Persea Americana* Mill. Cv. "Hass") en poscosecha para dos Municipios de Antioquia. *Temas Agrarios*, 19, 32-47.
- Mishra, P., Yonar, A., Yonar, H., Kumari, B., Abotaleb, M., Das, S.S., & Patil, S. (2021). State of the art in total pulse production in major states of India using ARIMA techniques. *Current Research in Food Science*, 4, 800-806. doi: 10.1016/j.crfs.2021.10.009.

- Montero-Calderón, M., & Cerdas-Araya, M. de M. (2012). Postharvest Physiology and Storage In Siddiq, M (Ed.), Tropical and subtropical fruits postharvest physiology, processing and packaging (pp. 17-34). Oxford: Willey.
- Park, Y., Jung, S., & Gorinstein, S. (2006). Ethylene treatment of Hwyard kiwifruits (*Actinidia deliciosa*) during ripening and its influence on ethylene biosynthesis and antioxidant activity. *Scientia Horticulturae*, 108 (1), 22-28. doi: 10.1016/j.scienta.2006.01.001.
- Payasi, A., Mishra, N. N., Chaves, A. L. S., & Singh, R. (2009). Biochemistry of fruit softening: an overview. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 15 (2), 103-113. doi: 10.1007/s12298-009-0012-z.
- Pedreschi, R., Uarrota, V., Fuentealba, C., Alvaro, J. E., Olmedo, P., Defilippi, B.G., Meneses, C., & Campos-Vargas, R. (2019). Primary Metabolism in avocado fruit. *Frontiers in Plant Science*, 10, 795. doi: 10.3389/fpls.2019.00795.
- Pérez-López, A., Chávez-Franco, S. H., Villaseñor-Perea, C. A., Espinosa-Solares, T., Hernández-Gómez, L. H., & Lobato-Calleros, C. (2014). Respiration rate and mechanical properties of peach fruit during storage at three maturity stages. *Journal of Food Engineering*, 142, 111–117. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2014.06.007.
- Pérez-López, A., Ramírez-Guzmán, M. E., Espinosa-Solares, T., Aguirre-Mandujano, E., & Villaseñor-Perea, C. (2020). Postharvest respiration of fruits and environmental factors interaction: An approach by dynamic regression models. *Scientia Agropecuaria*, 11 (1), 23-29. doi: 10.17268/sci.agropecu.2020.01.03.
- Ravindra, M., & Goswami, T. (2008). Modelling the respiration rate of green mature mango under aerobic conditions. *Biosystems Engineering*, 99 (2), 239–248 doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.10.005.
- Rosas-Flores, N., Saucedo-Veloz, C., Saucedo-Reyes, D., López-Jimenez, A., Valle-Guadarrama, S., Ramírez Guzmán, M.E., & Chávez Franco, S.H.

- (2020). Maduración en poscosecha de frutos de aguacate cultivares Hass y Méndez tratados con etefón. *Acta Agronómica*, 69 (4), 275-284. doi: 10.15446/acag.v69n4.89994.
- RStudio Team. 2020. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA <http://www.rstudio.com/>
- Ruby-Figueroa, R., Saavedra, J., Bahamonde, N., & Cassano, A. (2017). Permeate flux prediction in the ultrafiltration of fruit juices by ARIMA models. *Journal of Membrane Science*, 524, 108-116. doi: 10.1016/j.memsci.2016.11.034.
- Sanz, S., Olarte, C., Ayala, F., & Echávarri, J. (2009). Evolution of quality characteristics of minimally processed asparagus during storage in different lighting conditions. *Journal of Food Science*, 74 (6), S296-302. doi: 10.1111/j.1750-3841.2009.01239.x.
- SAS Institute Inc. 2018. SAS/ETS 15.1 User's Guide. Cary, NC. USA.
- Saucedo, P. S., Rojas, M. R., Aguilera, C. A. F., Saenz, G. A., De La Garza, H., Jasso, C. D., & Aguilar, C. N. (2009). Edible film based on candelilla wax to improve the shelf life and quality of avocado. *Food Research International*, 42 (4), 511-515. doi: 10.1016/j.foodres.2009.02.017.
- Sugihara, G., May, R., Ye, H., Hsieh, C.H., Deyle, E., Fogarty, M., & Munch, S. (2012). Detecting causality in complex ecosystems. *Science*, 338 (6106), 496–500. doi: 10.1126/science.1227079.
- Taiti, C., Costa, C, Menesatti, P., Caparrotta, S., Bazihizina, N., Azzarello, E., Petrucci, A., Masi, E. & Giordani, E. (2015). Use of volatile organic compounds and physicochemical parameters for monitoring the post-harvest ripening of imported tropical fruits. *European Food Research and Technology*, 241 (1), 91-102. doi: 10.1007/s00217-015-2438-6.
- Talens-Oliag, P. (2017). Evaluación del color y tolerancia de color en alimentos a través del espacio CIELAB. Universidad Politécnica de Valencia. Consultado en

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83392/Talens%20-%20Evaluaci%C3%B3n%20del%20color%20y%20tolerancia%20de%20color%20en%20alimentos%20a%20trav%C3%A9s%20del%20espacio%20CIELAB.pdf?sequence=1>

- Tesfay, S. Z., Magwaza, L. S., Mbili, N., & Mditshwa, A. (2017). Carboxyl methylcellulose (CMC) containing moringa plant extracts as new postharvest organic edible coating for Avocado (*Persea americana* Mill.) fruit. *Scientia Horticulturae*, 226, 201-207. doi: 10.1016/j.scienta.2017.08.047.
- Vallejo-Pérez, M. R., Teliz-Ortíz, D, Colinas-León, M. T., De la Torre-Almaraz, R., Valdovinos-Ponce, G., Nieto-Ángel, D., & Ochoa-Martínez, D. L. (2015). Alterations induced by avocado sunblotch viroid in the postharvest physiology and quality of avocado 'Hass' fruit. *Phytoparasitica*, 43, 355-364. doi: 10.1007/s12600-015-0469-y.
- Yang, B., Li, H. G., & Wen, B. (2017). A dynamic time delay analysis approach for correlated process variables. *Chemical Engineering Research and Design*, 122, 141-150. doi:10.1016/j.cherd.2017.04.010.
- Yuan, C. Q., Liu, S. F., & Fang, Z. G. (2016). Comparision of China's primary energy consumption forecasting by using ARIMA (the autoregressive integrated moving average) model and GM (1,1) model. *Energy*, 100 (1), 384-390. doi:10.1016/j.energy.2016.02.001.
- Zapata, J. E., Ochoa, A. S., Ceja E. J., Gómez, V. F. A., & Ríos, M. A. F. (2014). Manual técnico poscosecha del aguacate Hass (*Persea americana* Mill). Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB). ISBN: 978-958-8843-11-7.
- Zhang, W., Wei, F., Horion, S., Fensholt, R., Forkel, M., & Brandt, M. (2022). Global quantification of the bidirectional dependency between soil moisture and vegetation productivity. *Journal of Agricultural Meteorology*, 313 (2022), 108735. doi:10.1016/j.agrformet.2021.108735.