



Publicación Cuatrimestral. Vol. 8, No 2, Mayo/Agosto, 2023, Ecuador (p. 1-16). Edición continua




<https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/index>

revista.bdlaciencia@utm.edu.ec

Universidad Técnica de Manabí

DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v8i2.5403>

MODELO DE PREDICCIÓN PARA LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE PAPA (*Solanum tuberosum*) EN ECUADOR

Victor Mario García-Mora^{1*} , Mercy Ilbay- Yupa² , Raúl Armando Ramos Veintimilla³ 

¹Grupo de Investigación GDETERRA. Facultad de Recursos Naturales. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

E-mail: victor.garcia@epoch.edu.ec

²Grupo de Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Universidad Técnica de

Cotopaxi. E-mail: mercy.ilbay@utc.edu.ec

³Docente. Facultad de Recursos Naturales. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

E-mail: raul.ramos@epoch.edu.ec

*Autor para la correspondencia: victor.garcia@epoch.edu.ec

Recibido: 15-12-2022 / Aceptado: 10-04-2023 / Publicación: 1-05-2023

Editor Académico: Julio Torres 

RESUMEN ESPAÑOL

En este estudio se generó el modelo de regresión múltiple para predecir el rendimiento del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en Ecuador, utilizando el registro anual de la producción de las Encuestas de Superficie y Producción Agropecuaria para el periodo 2002-2019. Las variables independientes consideradas, fueron la superficie sembrada con semillas comunes, mejoradas y certificadas, prácticas de cultivo, volumen de venta y superficie sembrada, perdida y cosechada. Los resultados evidencian que el rendimiento se ve influenciado por cinco variables independientes como son: semilla mejorada, riego, aplicación de fertilizantes, helada y otros. El modelo de regresión múltiple presenta un buen ajuste con un coeficiente de determinación de 0,86, un RMSE de 1,014 ton/ha y un MAE significativamente bajo (0,024 ton/ha), el cual ayuda a verificar el arreglo del modelo. Por otra parte, la evaluación del incremento del rendimiento ($p \leq 0.01$) reveló tasas de crecimiento promedio anual entre 0,87 y 2,07% para las provincias de Tungurahua (0,87%), Pichincha (1,26%), Chimborazo (1,54%), Carchi (1,71%), Cotopaxi (1,91%) y Bolívar (2,07%). La predicción del rendimiento del cultivo de papa en Ecuador se centra principalmente en la influencia de los factores climáticos y tecnologías de cultivo. Es importante que las acciones políticas permitan que los agricultores tengan acceso al crédito y favorezca el uso de tecnologías de manejo del cultivo como el riego, fertilización y controles fitosanitarios.

Palabras clave: papa, regresión lineal múltiple, rendimiento, Ecuador.

PREDICTION MODEL FOR FACTORS INFLUENCING POTATO (*Solanum tuberosum*) CROP YIELD IN ECUADOR



ABSTRACT

In this study, the multiple regression model was generated to predict the yield of potato (*Solanum tuberosum*) crop in Ecuador, using the annual production record of the Agricultural Surface and Production Surveys for the period 2002-2019. The independent variables considered were the area sown with common, improved, and certified seeds, cultivation practices, sales volume, and area sown, lost, and harvested. The results show that yield is influenced by five independent variables such as improved seed, irrigation, fertilizer application, frost, and others. The multiple regression model has a good fit with a coefficient of determination of 0.86, an RMSE of 1.014 ton/ha, and a significantly low MAE (0.024 ton/ha), which helps verify the arrangement of the model. On the other hand, the evaluation of the yield increase ($p \leq 0.01$) revealed average annual growth rates between 0.87 and 2.07% for the provinces of Tungurahua (0.87%), Pichincha (1.26%), Chimborazo (1.54%), Carchi (1.71%), Cotopaxi (1.91%) and Bolívar (2.07%). Potato crop yield prediction in Ecuador focuses mainly on the influence of climatic and genetic factors. Policy actions must allow farmers to have access to credit and favor the use of crop management technologies such as irrigation, fertilization, and phytosanitary controls.

Keywords: potato, multiple linear regression, yield, Ecuador.

MODELO DE PREDIÇÃO DE FATORES QUE INFLUENCIAM O RENDIMENTO DA CULTIVO DA POTATO (*Solanum tuberosum*) NO EQUADOR

RESUMO

Neste estudo, o modelo de regressão múltipla foi gerado para prever o rendimento da cultura da batata (*Solanum tuberosum*) no Equador, utilizando o registro anual de produção dos Inquéritos à Superfície e à Produção Agrícola para o período 2002-2019. As variáveis independentes consideradas foram a área semeada com sementes comuns, melhoradas e certificadas, práticas de cultivo, volume de vendas e área semeada, perdida e colhida. Os resultados mostram que o rendimento é influenciado por cinco variáveis independentes, tais como: sementes melhoradas, irrigação, aplicação de fertilizantes, geada e outras. O modelo de regressão múltipla tem um bom ajuste com um coeficiente de determinação de 0,86, um RMSE de 1.014 tonelada/ha e um MAE significativamente baixo (0,024 tonelada/ha), o que ajuda a verificar o arranjo do modelo. Por outro lado, a avaliação do aumento do rendimento ($p \leq 0,01$) revelou taxas médias de crescimento anual entre 0,87% e 2,07% para as províncias de Tungurahua (0,87%), Pichincha (1,26%), Chimborazo (1,54%), Carchi (1,71%), Cotopaxi (1,91%) e Bolívar (2,07%). A previsão do rendimento das culturas de batata no Equador centra-se principalmente na influência de fatores climáticos e genéticos. É importante que as ações políticas permitam aos agricultores ter acesso ao crédito e favoreçam a utilização de tecnologias de gestão de culturas como a irrigação, a fertilização e os controlos fitossanitários.

Palavras chave: batata, regressão linear múltipla, rendimento, Equador.

Citación sugerida: García, V., Yupa, M., Ramos, R. (2023). MODELO DE PREDICCIÓN PARA LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE PAPA (*Solanum tuberosum*) EN ECUADOR. Revista Bases de la Ciencia, 8(2), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v8i2.5403>





1. INTRODUCCIÓN

La papa es el tercer cultivo más importante del mundo en términos de consumo humano después del arroz y del trigo; la producción de papa ha aumentado dramáticamente durante la última década (FAO, 2022). Aproximadamente 1,4 mil millones de personas consumen regularmente papa, ya que constituye la principal fuente de seguridad alimentaria y de salud mundial, porque es un alimento rico en carbohidratos y bajo en grasas, y una fuente importante de proteínas, almidón, vitaminas, minerales y antioxidantes (Lutaladio & Castaldi, 2009). El cultivo de papa se caracteriza por su versatilidad en términos de productividad, desarrollo en una amplia gama de climas agroecológicos y sus diversos usos agronómicos e industriales (Salcedo & Guzmán, 2014). En la actualidad, la papa se cultiva en todo el mundo, en una variedad de climas; sin embargo, se ha observado que los mejores rendimientos se obtienen en regiones templadas y con un suministro adecuado de agua (INIA, 2017).

La predicción del rendimiento de los cultivos es fundamental para los agricultores y las industrias relacionadas con la agricultura (Shastry et al., 2017) y para garantizar la seguridad alimentaria en países como Ecuador, donde la papa representa el cuarto cultivo transitorio de mayor importancia en superficie sembrada y el tercer lugar como cultivo de mayor producción a nivel nacional, después del maíz duro seco y arroz en cáscara. Las zonas de mayor producción de papa se concentran en las provincias de Carchi, Pichincha, Chimborazo, Cotopaxi y Tungurahua (ESPAC, 2017). La superficie sembrada de papa a nivel nacional fue de 20.950 hectáreas, siendo Carchi la provincia donde se concentra la mayor producción (41,27%) a nivel nacional (ESPAC, 2021). Los factores importantes de la producción agrícola y su variación incluyen la genética, tecnología, clima, suelo, prácticas de gestión de campo y las decisiones asociadas, como la aplicación de fertilizantes, labranza y la selección de cultivos híbridos, gestión del riego, entre otras (Kukal & Irmak, 2018). Sin embargo, a escala mundial, más del 21 % de la variación del rendimiento podría explicarse por la variación agroclimática (Iizumi & Ramankutty, 2016), estos factores climáticos tienen mayor influencia que los factores tecnológicos (Feng et al., 2018).

En la actualidad se da importancia a los modelos estadísticos que predicen el rendimiento de diferentes cultivos, estos modelos representan el comportamiento del rendimiento basado en variables de entrada (Bocco et al., 2015; Liu et al., 2018; Montemayor Trejo et al., 2017). Existen varios métodos para determinar el rendimiento, como modelos de regresión lineal y múltiple, algoritmos de aprendizaje automático, redes neuronales, entre otras. Los modelos de regresión son los procesos estadísticos más utilizados para estimar las relaciones entre variables dependientes e independientes,

que se han aplicado con frecuencia en una amplia gama de investigaciones (Etemadi & Khashei, 2021). La regresión lineal múltiple se usa ampliamente para examinar la relación entre conjuntos de variables y proporciona más interacción y control del usuario sobre el análisis predictivo y presenta ventajas comparativas de los modelos de regresión sobre los modelos de aprendizaje automático lo cual es evidente (Hosseinzadeh et al., 2020). Un estudio de predicción del rendimiento de papa orgánica usando sistemas de labranza y propiedades del suelo por red neuronal artificial (RNA) y regresiones lineales múltiples (RLM) encontró que el rendimiento de la papa se vio significativamente afectado por la labranza y las propiedades del suelo; además los resultados evidencian que el modelo RLM estimó el rendimiento del cultivo con mayor precisión que el modelo RNA (Abrougui et al., 2019). Otro estudio realizó un pronóstico de la variación espacio-temporal del rendimiento de varios cultivos en China mediante regresión lineal múltiple por pasos (Liu et al., 2021). También, se han utilizado modelos matemáticos mediante análisis de RLM para describir la relación entre los índices de crecimiento de los racimos de tomate y los factores ambientales en el cultivo en invernadero y su predicción del rendimiento (Doan & Tanaka, 2022). En este estudio se utilizó el modelo de regresión múltiple para predecir la influencia de los factores climáticos y tecnológicos en el rendimiento del cultivo de papa en Ecuador y de esta manera generar información necesaria para toma de decisiones en la planificación tanto de los actores públicos y privados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Datos

En este documento se recopiló información para el periodo 2002-2019 de las Encuestas de Superficie y Producción Agropecuaria (ESPAC) del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), información disponible en <https://aplicaciones3.ecuadorencifras.gob.ec/BIINEC-war/index.xhtml>. El conjunto de datos disponibles se empleó para construir varios modelos utilizando una variedad de técnicas con el objetivo de seleccionar el modelo preciso. Las provincias consideradas en este estudio corresponden a Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Bolívar, Chimborazo, Cañar, Azuay y Loja, cuyas superficies dependen de las técnicas y prácticas en el cultivo ya que, la variabilidad del clima y factores agronómicos difieren significativamente en regiones diversas.

2.2. Variables

En esta investigación se utilizó como variables dependientes el rendimiento del cultivo de papa y como independientes la superficie sembrada con diferentes tipos de semilla, (común, mejorada y certificada) prácticas de cultivo, volumen de venta y superficie (sembrada, perdida y cosechada)

2.2.1. Superficie sembrada por variedad de la planta



Para este apartado se consideró cuatro variables de semillas: común, mejorada, certificada e híbrida. Las semillas pueden provenir de un proceso por el cual no ha existido ningún tipo de selección, con técnicas conocidas o comprobadas, por ello el término de semilla común. Las semillas con características de mejoramiento (manipuladas genéticamente), tienen como particularidad, el aumento del rendimiento y la mejoría de los componentes que le afectan (plagas, enfermedades, condiciones adversas del clima), incluyendo el progreso de cualquier otra característica de interés para el fitomejorador. Las plantas mejoradas deben pasar por un proceso de certificación otorgado por una organización competente, que abalice el estado de calidad y sanidad para la comercialización. La obtención de semillas híbridas requiere el cruzamiento de dos parentales de diferente característica (líneas homocigotas con igual contenido génico pero diferente contenido alélico), cuyo resultado trasciende a la generación de individuos con características superiores a los progenitores (INEC, 2017).

2.2.2. Superficie plantada por práctica de cultivo

Los mayores rendimientos de papa requieren de un incremento en el uso de insumos, lo cual generalmente suele estar vinculado a un mercado específico y, por tanto, altos precios. La información relevante sobre el rendimiento podría ser la consecuencia de la participación conjunta de los agricultores (Cavatassi et al., 2011)

Fue considerado como prácticas de cultivo a la superficie regada por algún método (gravedad o aspersión), aplicación de fertilizantes y plaguicidas (químicos y orgánicos).

2.2.3. Superficie perdida por diferentes causas

Las principales causas de las pérdidas en los cultivos se dan por las sequías, heladas, plagas, enfermedades y otras razones

2.2.4. Cosecha

Las papas se cosechan, una vez que el follaje se ha marchitado, para lo cual, en un día seco se cava el suelo, teniendo cuidado de no perforar los tubérculos. En esta variable se consideró el área que se logró cosechar, bajo el sistema de siembra de solo.

2.3. Análisis de tendencia del rendimiento del cultivo de papa a nivel provincial

Para este apartado se recopiló información de un gran conjunto de datos de rendimiento del cultivo de papa, que cubría las 10 provincias de mayor producción en el Ecuador desde el período 2002 hasta

2019 (18 años). Esta base de datos fue sometida al Test de Mann-Kendall para identificar tendencia monótona en los rendimientos del cultivo por provincia, esta prueba no paramétrica determina si existe o no tendencias en los datos de serie de tiempo sin importar si es lineal o no lineal; además en este test no se efectúa ninguna suposición subyacente sobre la existencia de la normalidad de los datos (Gómez-Gómez et al., 2003). Las hipótesis que se probaron fueron las siguientes:

H_0 (hipótesis nula): No existe tendencia en los datos de rendimiento.

H_a (hipótesis alternativa): Existe tendencia (positiva o negativa) en los datos de rendimiento.

2.4. Modelos de regresión múltiple

La regresión lineal múltiple (MRL) es una técnica estadística, que en este estudio permitió predecir el rendimiento del cultivo de papa en el Ecuador. El análisis de regresión es ampliamente utilizado con fines de predicción (Afrasiabian & Eftekhari, 2022; Binyamin et al., 2022; Pahlavan-Rad et al., 2020; Shastry et al., 2017), cuando el valor de una variable específica (respuesta) se puede predecir en función de los valores de otras variables (explicativa) como se observa en la siguiente ecuación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \cdots \beta_n X_n + \varepsilon$$

donde,

Y es la variable dependiente;

β_0 es la intersección con Y ;

β_1 a β_n son los coeficientes de la regresión y representan el cambio de una unidad en la variable dependiente (X);

ε es el término del error aleatorio (residual) del modelo.

En la predicción del rendimiento del cultivo primero se verificó cuatro supuestos, como la normalidad, donde todas las variables deben tener una distribución normal, caso contrario se debe proceder a normalizarlas. En el MRL los datos deben estar libres de heteroscedasticidad para ello se aplicó prueba de correlación de rangos de Spearman. La tercera suposición es la linealidad, en el modelo debe existir entre las variables de respuesta e independiente una relación lineal. En la última suposición se verificó la multicolinealidad, es decir el alto grado de correlación entre las variables controladas.



Para determinar el modelo de predicción se aplicó el método de regresión por pasos, que es una combinación de selección hacia adelante y eliminación hacia atrás (Ghani & Ahmad, 2010). Considerando un nivel de significación (P-value) de 0,1. Este nivel de significancia es un término estadístico denotado por un valor P que define la probabilidad de rechazar la prueba de hipótesis nula cuando es verdadera. De esta manera se fueron eliminando las variables que no jugaron un papel sustancial en la ecuación de predicción del rendimiento del cultivo de papa.

2.4.1. Ajuste del modelo

Para evaluar la eficiencia de los modelos propuestos para predecir el rendimiento del cultivo de papa en el Ecuador se utilizaron varios índices estadísticos, incluidos el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE).

El R^2 establece la porción de cambio en la base de datos que predice el modelo, su valor va de 0 a 1; donde cero indica que el modelo no tiene capacidad para predecir el rendimiento y uno que el modelo es capaz de predecir el rendimiento del cultivo de papa.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

donde,

n es el número de observaciones

P_i y O_i son los valores de rendimiento pronosticados y observados respectivamente;

\bar{O} es la media de los valores observados El error cuadrático medio (RMSE), mide el rendimiento del modelo de regresión. La idea es medir cuánto error existe, en comparación con la información original. Por tanto, es oportuno un RMSE con valores bajos. Se determina de la siguiente forma:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

donde,

n es el número de observaciones

P_i y O_i son los valores de rendimiento pronosticados y observados respectivamente

El error absoluto medio (MAE), es la media de los valores absolutos de los errores de predicción individuales en todas las instancias del conjunto de prueba. Cada error de predicción es la diferencia entre el valor real y el valor previsto para la instancia.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$$

donde,

n es el número de observaciones

P_i y O_i son los valores de rendimiento pronosticados y observados respectivamente

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

3.1.1. Estadísticas descriptivas de las variables dependientes y explicativas

Las estadísticas resumidas del rendimiento del cultivo de papa y las variables explicativas que se incluyeron en el modelo final se enumeran en la **Tabla 1**, El rendimiento exhibió una distribución, cuyo coeficiente de asimetría (0,79), muestra un sesgo de la variabilidad hacia la derecha y la curtosis aplanada de -0,88, indica una variabilidad notable. El valor medio de 8,418 ton/ha, se aleja de la mediana (7,1 ton/ha), lo cual corrobora la variabilidad. Sin embargo, la desviación estándar (DE) de 2,81 ton/ha, indica un rendimiento bastante constante.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos para la variable dependiente y las variables independientes.

	Min.	1st Qu.	Mediana	Media	3rd Qu.	Max.	Error típico	DE	Curtosis	Asimetría
Rendimiento (ton/ha)	4,7	6,7	7,1	8,418	11,4	13,7	0,68	2,81	-0,88	0,79
Semilla Mejorada (has)	2273	2634	3099	3404	3949	5633	244,75	1009	0,30	0,95
Riego (has)	7851	12975	14671	14411	17588	21178	876,62	3614	-0,41	-0,10
Aplicación de fertilizantes (has)	8893	8534	2272	7926	5171	4252	2554,97	10534	-0,87	-0,53
Helada (has)	99,1	390	707	921,5	1090	3030	20,21	83,31	-0,28	0,57
Otros (has)	0	0	13,5	52,44	63,4	275	18,50	76,30	3,60	1,90

3.1.2. Variación temporal y espacial del rendimiento de papa

A escala nacional seis de las once provincias presentaron tendencia de aumento del rendimiento del cultivo de papa (círculos grises oscuro) para el periodo de 2002 al 2019; la tendencia de incremento del rendimiento fue estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 99 %, como lo indican los valores de p (0,01) (**Figura 1**). La tasa de crecimiento promedio anual del rendimiento varió de una provincia a otra; Tungurahua (0,87%), Pichincha (1,26%), Chimborazo (1,54%), Carchi (1,71%), Cotopaxi (1,91%) y Bolívar (2,07%).

Pero las provincias de Loja, Azuay, Cañar e Imbabura no presentaron cambios en el rendimiento de papa (ST).

Las razones de la variación pueden ser muy diversas, sin embargo, la disponibilidad del recurso hídrico y de semilla mejorada afecta positivamente el rendimiento, por tanto, el conocimiento adquirido en estas zonas resulta interesante aplicarlo en otras (Singaña, 2021).

La distribución espacial del aumento del rendimiento de papa se localiza en las provincias de la zona centro del Ecuador (**Figura 1**).

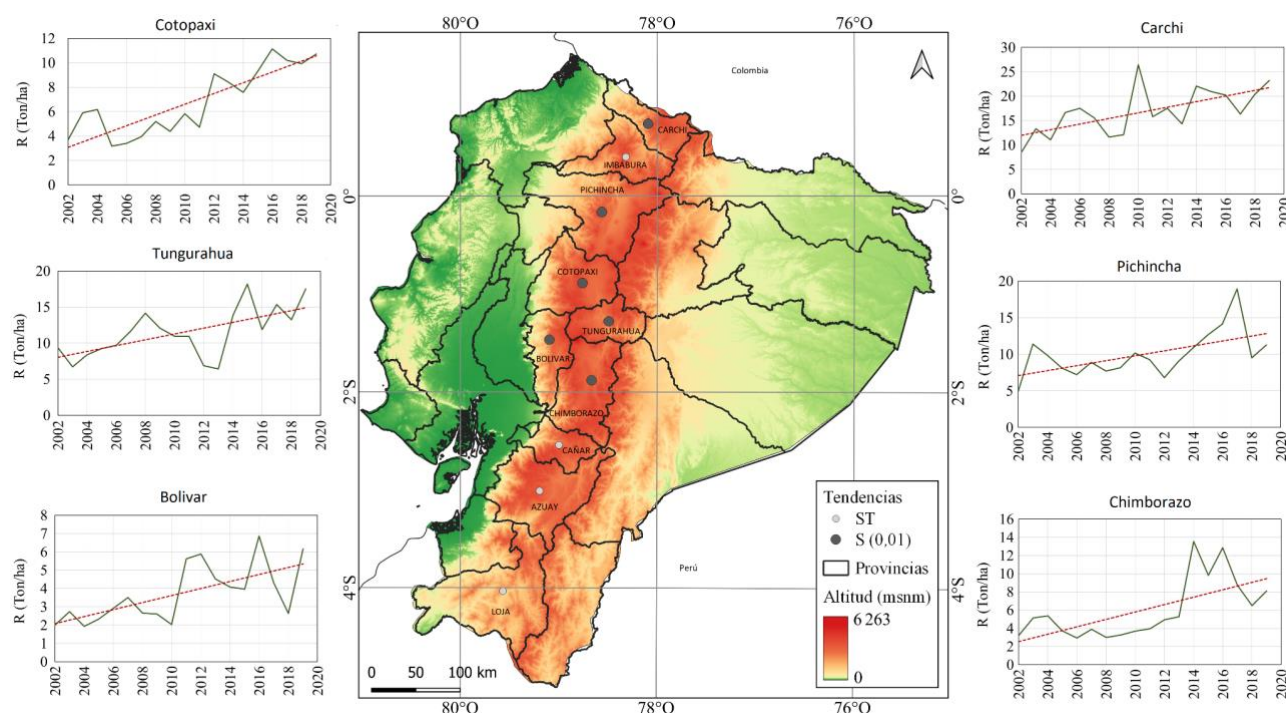


Figura 1. Variabilidad espacial de la distribución de tendencias del rendimiento del cultivo de papa en las provincias productoras.

3.1.3. Modelo de regresión lineal múltiple paso a paso y evaluación del rendimiento

El modelo de regresión lineal múltiple para predecir el rendimiento del cultivo de papa incluyó once variables de respuesta, que explican el 67 % de la varianza del rendimiento. Las variables de respuesta como las hectáreas de semilla común y certificada, aplicación de fitosanitarios, presencia de sequías, heladas y plagas se eliminaron del modelo en el proceso regresión por pasos. En la **Tabla 2**, encontramos los parámetros estimados del modelo final, donde, se muestra el intercepto, y los coeficientes de regresión de las cinco variables explicativas para el rendimiento de papa.

Tabla 2. Coeficientes de regresión para las variables ajustadas, al modelo de rendimiento de papa.

Variables	Coeficientes de regresión	Error Estándar
Intercepto	18,310	1,801
Semilla Mejorada (has)	0,00043	0,00033
Riego (has)	-0,00021	0,00015
Aplicación de Fertilizantes (has)	-0,00023	0,00006
Helada (has)	0,00107	0,00064
otros (has)	-0,01027	0,00571

La variable Riego (ha), lo cual se entiende por superficie bajo riego, tiene un coeficiente negativo, lo cual indica que, a medida que aumenta la superficie sin riego, la contribución es contraria a un rendimiento positivo, esta afirmación es análoga a las variables con coeficientes negativos como lo es también la aplicación de fertilizantes y otros. Sin embargo, los coeficientes positivos indican que la contribución es directamente proporcional a un rendimiento alto como el área de papa sembrada con semilla mejorada, esta afirmación contradice el efecto de las heladas, por ello se toma en cuenta que los valores son significativamente bajos, como para notar un efecto eficiente, considerando además que las heladas no es un factor recurrente en muchos sectores donde se lleva a cabo este cultivo.

El rendimiento del modelo se muestra en la **Tabla 3**, donde, el coeficiente de determinación R^2 fue de 0,86 y prácticamente igual al R-cuadrado ajustado del modelo de regresión múltiple, lo que indica que el modelo lineal es válido para la predicción del comportamiento del rendimiento de papa según las variables seleccionadas. El RMSE, indica la distancia entre el valor real y el valor pronosticado, lo ideal es obtener un valor de cero, sin embargo, esta medida de variabilidad está sujeta a la



influencia de valores atípicos, por esta razón se compara con la métrica de dispersión MAE, porque existe una ponderación individual ajustada al modelo de regresión, lo cual para el caso que observamos con un valor de 0,024 ton/ha, se verifica un buen rendimiento del modelo, corroborando el R^2 como un modelo de predicción aceptable para el rendimiento en el cultivo de papa.

Tabla 3. Rendimiento del modelo de regresión lineal múltiple para el cultivo de papa.

Métrica	Rendimiento
R^2	0,86
RMSE	1,014
MAE	0,024

El rendimiento del cultivo de papa en Ecuador pronosticado para el periodo 2002 al 2017 evidencia que el modelo de regresión múltiple presenta un buen ajuste considerando los datos observados, a pesar de que suavizaba ligeramente los datos y subestima los extremos (**Figura 2a**). De la misma manera el diagrama de dispersión del rendimiento de papa observado contra las predicciones mostró que el modelo pronosticó bastante bien el rendimiento (**Figura 2b**).

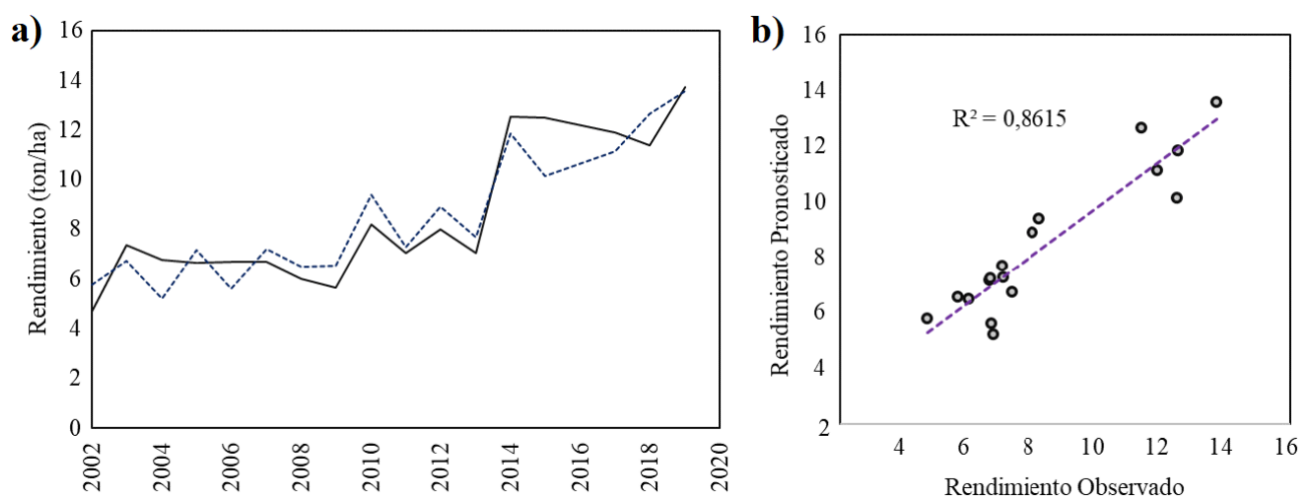


Figura 2. Gráficas de series de rendimiento de papa (a) y de dispersión (b) del rendimiento de la papa observado y pronosticado.

3.2. Discusión

La estrategia de riego es considerada como una entrada obligatoria en los modelos de predicción del rendimiento (Haverkort et al., 2015) y se considera que un área bajo riego genera incrementos en la producción de alta calidad, que generan importantes beneficios económicos a los agricultores (Chengot et al., 2023). Pero si el cultivo está expuesto a heladas (condiciones ambientales) el rendimiento disminuye (Hunt et al., 2019) como es el caso de esta investigación.

La forma de aplicación de los fertilizantes en el cultivo de papa afecta significativamente el rendimiento, por ello es fundamental la nutrición inorgánica, con productos de liberación lenta ya que se ha demostrado que favorece la productividad (Petroopoulos et al., 2020). Sin embargo, el uso de fertilizantes está determinado por la capacidad financiera del agricultor, la disponibilidad a fuentes de financiamiento, políticas estatales y el uso de la tierra en términos de extensión (Vasco et al., 2021), son limitantes para los productores ecuatorianos y desmejoran el aumento de la productividad.

Los factores importantes en el rendimiento de los cultivos es el medio ambiente (parámetros del suelo y variables climáticas), manejo del cultivo (estrategias de riego, fertilización, control de plagas y enfermedades, entre otros) y la genética que interactúan en gran medida (Ávila-Valdés et al., 2020; Raymundo et al., 2018). Sin embargo, a gran escala más del 21 % de la variación del rendimiento podría explicarse por la variación agroclimática (Iizumi & Ramankutty, 2016) y la genética del cultivo; es decir, los factores climáticos y genéticos tienen mayor influencia que los factores tecnológicos (Feng et al., 2018). Estos datos concuerdan con esta investigación donde las heladas (factor climático) y semillas mejoradas (factor genético) tiene influencia positiva en el modelo de regresión lineal múltiple para el rendimiento de papa. Pero, las estrategias de riego y aplicación de fertilizantes (factores tecnológicos) tienen una menor influencia y limitan el rendimiento del cultivo de papa. Resultados similares fueron encontrados por Amare et al. (2022), donde la aplicación de fertilizantes, control de plagas y el riego son factores que restringen el rendimiento de la papa.

4. CONCLUSIONES

El cultivo de papa es uno de los más importantes, debido a su consumo y nutrición. La información obtenida del INEC, respecto a la variable respuesta correspondiente al rendimiento del cultivo de papa a nivel nacional en ton/ha, obtuvo una variabilidad constante en los años de estudio (2022 - 2019). Dicha variabilidad estuvo figurada en las provincias de Tungurahua, Pichincha, Chimborazo, Carchi, Cotopaxi y Bolívar, contrariamente en las provincias de Loja, Azuay, Cañar e Imbabura. Las variables cuyo modelo de regresión denotaron una relación directa con el rendimiento fueron el uso de semillas mejoradas (has), riego, aplicación de fertilizantes (has), heladas (has) y otros (has), cuyo



$R^2(0,86)$ fue lo suficientemente robusto para validar el modelo, no siendo corroborado por un RMSE lejano al valor ideal, debido a un sesgo causado por valores atípicos, pero comparado con MAE se obtiene un valor significativamente bajo, verificando el ajuste del modelo.

En el Ecuador, la superficie de papa bajo condiciones de tecnificación de riego es relativamente baja, al igual que la aplicación de fertilizantes efectivos para el rendimiento. El uso de semillas mejoradas es poco común y las semillas clonales comúnmente utilizadas por los agricultores están perdiendo viabilidad, lo cual agrava el efecto de la productividad. Es necesario el acceso a créditos y acciones políticas concretas para reducir la brecha de producción en el cultivo de papa en favor del desarrollo socioeconómico de los agricultores.

5. DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

6. REFERENCIAS

- Abrougui, K., Gabsi, K., Mercatoris, B., Khemis, C., Amami, R., & Chehaibi, S. (2019). Prediction of organic potato yield using tillage systems and soil properties by artificial neural network (ANN) and multiple linear regressions (MLR). *Soil and Tillage Research*, 190, 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.011>
- Afrasiabian, B., & Eftekhari, M. (2022). Prediction of mode I fracture toughness of rock using linear multiple regression and gene expression programming. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.03.008>
- Amare, T., Bazie, Z., Alemu, E., Alemayehu, B., Tenagne, A., Kerebh, B., Taye, Y., Awoke, A., Feyisa, T., & Kidanu, S. (2022). Yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) increased by more than two-folds through nitrogen and phosphorus fertilizers in the highlands of North-Western Ethiopia. *Heliyon*, 8(10), e11111. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11111>
- Ávila-Valdés, A., Quinet, M., Lutts, S., Martínez, J. P., & Lizana, X. C. (2020). Tuber yield and quality responses of potato to moderate temperature increase during Tuber bulking under two water availability scenarios. *Field Crops Research*, 251, 107786. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107786>
- Binyamin, R., Ahmed, N., Ashraf, W., Li, Y., Ghani, M. U., Zeshan, M. A., Ali, S., Khan, A. U. R., Ahmed, R., Ahmed, M. A. A., Aljowaie, R. M., Alkahtani, A. M., & Vachova, P. (2022). Prediction of mungbean yellow mosaic virus disease using multiple regression models. *Journal of King Saud University - Science*, 102094. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102094>
- Bocco, M., Sayago, S., & Violini, S. (2015). Modelos simples para estimar rendimiento de cultivos agrícolas a partir de imágenes satelitales: Una herramienta para la planificación. 2(2), 10.

- Cavatassi, R., Salazar, L., González-Flores, M., & Winters, P. (2011). How do Agricultural Programmes Alter Crop Production? Evidence from Ecuador. *Journal of Agricultural Economics*, 62(2), 403-428. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.2010.00279.x>
- Chengot, R., Knox, J. W., Coxon, G., Cojocar, G., & Holman, I. P. (2023). An enhanced version of the D-Risk decision support webtool for multi-scale management of water abstraction and drought risks in irrigated agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204, 107516. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107516>
- Doan, C. C., & Tanaka, M. (2022). Relationships between Tomato Cluster Growth Indices and Cumulative Environmental Factors during Greenhouse Cultivation. *Scientia Horticulturae*, 295, 110803. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110803>
- ESPAC. (2017). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. Presentación Principales Resultados ESPAC -INEC 2017.pdf.
- ESPAC. (2021). Principales resultados-ESPAC_2021. INEC. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2021/Principales%20resultados-ESPAC_2021.pdf. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2021/Principales%20resultados-ESPAC_2021.pdf
- Etemadi, S., & Khashei, M. (2021). Etemadi multiple linear regression. *Measurement*, 186, 110080. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110080>
- FAO. (2022). *Duplicar la producción mundial de papa en 10 años es posible. Congreso Mundial de la Papa.* <https://www.fao.org/newsroom/detail/doubling-global-potato-production-in-10-years-is-possible/es>. Newsroom. <https://www.fao.org/newsroom/detail/doubling-global-potato-production-in-10-years-is-possible/es>
- Feng, W., Liu, Y., Kong, X., Chen, Y., & Pan, J. (2018). Spatial and Temporal Variation of Grain Production and Its Influencing Factors at the County Level in China. <https://doi.org/10.15957/j.cnki.jjdl.2018.05.018>
- Ghani, I. M. M., & Ahmad, S. (2010). Stepwise Multiple Regression Method to Forecast Fish Landing. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 8, 549–554. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.12.076>
- Gómez-Gómez, M., Danglot-Banck, C., & Vega-Franco, L. (2003). *Sinopsis de pruebas estadísticas no paramétricas. Cuando usarlas*. 70(2), 10.
- Haverkort, A. J., Franke, A. C., Steyn, J. M., Pronk, A. A., Caldiz, D. O., & Kooman, P. L. (2015). A Robust Potato Model: LINTUL-POTATO-DSS. *Potato Research*, 58(4), 313–327. <https://doi.org/10.1007/s11540-015-9303-7>
- Hosseinzadeh, A., Baziar, M., Alidadi, H., Zhou, J. L., Altaee, A., Najafpoor, A. A., & Jafarpour, S. (2020). Application of artificial neural network and multiple linear regression in modeling nutrient recovery in vermicompost under different conditions. *Bioresource Technology*, 303, 122926. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122926>
- Hunt, J. R., Lilley, J. M., Trevaskis, B., Flohr, B. M., Peake, A., Fletcher, A., Zwart, A. B., Gobbett, D., & Kirkegaard, J. A. (2019). Early sowing systems can boost Australian wheat yields despite recent climate change. *Nature Climate Change*, 9(3), Art. 3. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0417-9>
- Iizumi, T., & Ramankutty, N. (2016). Changes in yield variability of major crops for 1981–2010 explained by climate change. *Environmental Research Letters*, 11(3), 034003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034003>
- INEC. (2017). *Glosario de la encuesta de superficie y producción agropecuaria continua. Definiciones básicas*.
- INEC. (2020). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua 2020*. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2020/Presntacion%20ESPAC%202020.pdf
- INIA. (2017). *Manual del cultivo de la papa en Chile*. Instituto de Desarrollo Agropecuario—Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 375.pdf.



<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6706/Bolet%C3%ADn%20INIA%20N%C2%B0%20375?sequence=1&isAllowed=y>

- Kukal, M. S., & Irmak, S. (2018). Climate-Driven Crop Yield and Yield Variability and Climate Change Impacts on the U.S. Great Plains Agricultural Production. *Scientific Reports*, 8(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21848-2>
- Liu, X., Zhou, T., Zhang, X., Zhang, S., Liang, X., Gani, R., & Kontogeorgis, G. M. (2018). Application of COSMO-RS and UNIFAC for ionic liquids based gas separation. *Chemical Engineering Science*, 192, 816–828. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.08.002>
- Liu, Y., Heuvelink, G. B. M., Bai, Z., He, P., Xu, X., Ding, W., & Huang, S. (2021). Analysis of spatio-temporal variation of crop yield in China using stepwise multiple linear regression. *Field Crops Research*, 264, 108098. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108098>
- Lutaladio, N., & Castaldi, L. (2009). Potato: The hidden treasure. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(6), 491–493. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.05.002>
- Montemayor Trejo, J. A., Munguía López, J., Segura Castruita, M. Á., Yescas Coronado, P., Orozco Vidal, J. A., Woo Reza, J. L., Montemayor Trejo, J. A., Munguía López, J., Segura Castruita, M. Á., Yescas Coronado, P., Orozco Vidal, J. A., & Woo Reza, J. L. (2017). La regresión lineal en la evaluación de variables de ingeniería de riego agrícola y del cultivo de maíz forrajero. *Acta universitaria*, 27(1), 40–44. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1255>
- Pahlavan-Rad, M. R., Dahmardeh, K., Hadizadeh, M., Keykha, G., Mohammadnia, N., Gangali, M., Keikha, M., Davatgar, N., & Brungard, C. (2020). Prediction of soil water infiltration using multiple linear regression and random forest in a dry flood plain, eastern Iran. *CATENA*, 194, 104715. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104715>
- Petropoulos, S. A., Fernandes, Â., Polyzos, N., Antoniadis, V., Barros, L., & C. F.R. Ferreira, I. (2020). The Impact of Fertilization Regime on the Crop Performance and Chemical Composition of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cultivated in Central Greece. *Agronomy*, 10(4), Art. 4. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040474>
- Raymundo, R., Asseng, S., Prasad, R., Kleinwechter, U., Condori, B., Bowen, W., Wolf, J., Olesen, J. E., Dong, Q., Zotarelli, L., Gastelo, M., Alva, A., Travasso, M., & Arora, V. (2018). Global field experiments for potato simulations. *Open Data Journal for Agricultural Research*, 4, 35–44. <https://doi.org/10.18174/odjar.v4i0.15813>
- Salcedo, S., & Guzmán, L. (2014). Recomendaciones de Política. Agricultura Familiar en América Latina y el Caribe. FAO. 486.
- Shastri, A., Sanjay, H. A., & Bhanusree, E. (2017). Prediction of Crop Yield Using Regression Techniques. *Int. J. SoftComput.*, 7.
- Singaña, D. (2021). Los límites de la productividad del cultivo de papa en Ecuador entre 2017 y 2018. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 25(1), Art. 1. <https://doi.org/10.37066/ralap.v25i1.416>
- Vasco, C., Torres, B., Jácome, E., Torres, A., Eche, D., & Velasco, C. (2021). Use of chemical fertilizers and pesticides in frontier areas: A case study in the Northern Ecuadorian Amazon. *Land Use Policy*, 107, 105490. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105490>

Contribución de autores

Autores	Contribución
Victor Mario García-Mora	Borrador original, conceptualización, metodología, resultados y conclusiones.
Mercy Ilbay-Yupa	Escritura científica, metodología, discusión y conclusiones
Raúl Armando Ramos Veintimilla	Modelación estadística y refuerzo a resultados