





Impact of Virtual Water on Peruvian Rice, Asparagus and Avocado Exports: 2014-2023

Heder Marino, Quispe Quiñones, Doctor ¹, Eleodoro Fidel, Robles Bautista, Magister ² Vanessa Danielle, Huayta Vera¹, Bachiller ³ Deysi Karina Quispe, Bachiller ⁴

¹Universidad Tecnológica del Perú, c19884@utp.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú, c20451@utp.edu.pe

³Universidad Tecnológica del Perú, u20201079@utp.edu.pe

⁴Universidad Tecnológica del Perú, u19100450@utp.edu.pe

Abstract- This research analyzes the impact of virtual water on Peru's rice, asparagus and avocado exports during 2014-2023. The study employs a quantitative approach based on official data from MIDAGRI, SENAMHI, ANA and COMEX. The results reveal a significant correlation between virtual water and agricultural export volume, with correlation coefficients above 0.90 for all three products. It was found that rice requires 1,856 liters/kg (71% blue water), asparagus 1,517 liters/kg (96% blue water) and avocado 1,111 liters/kg (69% blue water). This research contributes to understanding the water footprint in Peruvian export agriculture and its implications for sustainable water management.

Keywords: Virtual water, water footprint, agricultural exports, sustainability, water resources.

Impacto del Agua Virtual en las Exportaciones de Arroz, Espárrago y Palta Peruana: 2014-2023

Resumen- Esta investigación analiza el impacto del agua virtual en las exportaciones peruanas de arroz, espárrago y palta durante 2014-2023. El estudio emplea un enfoque cuantitativo basado en datos oficiales de MIDAGRI, SENAMHI, ANA y COMEX. Los resultados revelan una correlación significativa entre el agua virtual y el volumen de exportaciones agrícolas, con coeficientes de correlación superiores a 0.90 para los tres productos. Se encontró que el arroz requiere 1,856 litros/kg (71% agua azul), el espárrago 1,517 litros/kg (96% agua azul) y la palta 1,111 litros/kg (69% agua azul). Esta investigación contribuye a la comprensión de la huella hídrica en la agricultura de exportación peruana y sus implicaciones para la gestión sostenible del agua.

Palabras clave: Agua virtual, huella hídrica, exportaciones agrícolas, sostenibilidad, recursos hídricos.

I. INTRODUCCIÓN

Perú, reconocido por su extraordinaria biodiversidad y abundancia de recursos naturales, enfrenta actualmente desafíos críticos en la gestión de sus recursos hídricos. A pesar de su riqueza natural, el país ocupa la posición 66 en el índice de estrés hídrico entre los estados miembros de la ONU, con un nivel preocupante entre -40% y -80% [1]. Esta situación se ha agravado por prácticas agrícolas ineficientes, gestión inadecuada de recursos hídricos y presiones demográficas crecientes [2]. La agricultura de exportación, un sector clave para la economía peruana, se encuentra particularmente vulnerable a esta problemática.

El concepto de agua virtual, definido como el volumen total de agua utilizado en la producción de bienes agrícolas, ha emergido como una herramienta crucial para entender el impacto real del comercio agrícola en los recursos hídricos [3]. En el contexto peruano, donde algunos agricultores consumen entre 14,000 y 18,000 m³ de agua por hectárea, la medición y gestión del agua virtual se vuelve especialmente relevante para la sostenibilidad del sector agrícola exportador [4].

En este contexto, es fundamental comprender que el comercio de agua virtual trasciende la simple definición de intercambio comercial. Este concepto representa la transferencia indirecta de recursos hídricos a través del comercio de productos, específicamente desde regiones con abundancia de agua hacia aquellas con escasez [4]. Este enfoque es particularmente relevante para el sector agrícola

peruano, donde el arroz, la palta y el espárrago representan importantes productos de exportaciones agrícolas del país [5], convirtiéndose en productos convenientes para el análisis del agua virtual.

La vulnerabilidad del sector agrícola peruano a eventos climáticos extremos se ha evidenciado históricamente. La severa sequía de 1992, que afectó a 16 departamentos, provocó significativas pérdidas en la producción agrícola y las exportaciones. Más recientemente, el Fenómeno del Niño de 2017 impactó negativamente en el crecimiento económico del sector, demostrando la estrecha relación entre la gestión del agua, la producción agrícola y el rendimiento económico [6]. Estos eventos históricos subrayan la importancia de comprender y gestionar eficientemente el agua virtual en el sector agrícola exportador.

La medición del agua virtual sirve como un indicador crucial para cuantificar el volumen total de agua empleada en la producción de bienes específicos [7] [8]. Este concepto se complementa con la huella hídrica, que se clasifica en tres componentes: agua azul (extraída de fuentes superficiales o subterráneas), agua verde (proveniente de precipitaciones y absorbida por los cultivos) y agua gris (requerida para diluir contaminantes hasta alcanzar estándares de calidad aceptables) [9]. Esta clasificación permite un análisis más detallado y preciso del impacto hídrico en la agricultura de exportación. Entendiendo que el agua virtual es usada principalmente en el seguimiento de la cantidad de agua adecuada para producir un bien, la huella hídrica ofrece un panorama más amplio que incluye la clase de agua utilizada, su origen y el impacto ambiental asociado, por lo cual es una herramienta más holística para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

La distribución de los tipos de agua virtual varía significativamente según el producto y la región de cultivo. Esta variación refleja la eficiencia y sostenibilidad de las prácticas agrícolas en diferentes contextos geográficos y climáticos. Por ejemplo, mientras que la producción de cacao en zonas tropicales utiliza predominantemente agua verde (98%) debido a las condiciones climáticas favorables, los cultivos de exportación peruanos muestran patrones diferentes de consumo hídrico que requieren un análisis detallado.

Este estudio tiene tres objetivos principales. Primero, analizar la relación entre la huella hídrica y el volumen de exportaciones de arroz, espárrago y palta. Segundo, evaluar cuantitativamente los patrones de consumo de agua virtual en estos cultivos estratégicos. Tercero, examinar la alineación

entre los planes nacionales de gestión sostenible del agua y las prácticas actuales del comercio de agua virtual en el sector agrícola exportador.

En ese sentido, se presenta en la Fig.1 la evolución de las exportaciones de espárragos del 2014 al 2023 en valores FOB(US\$)

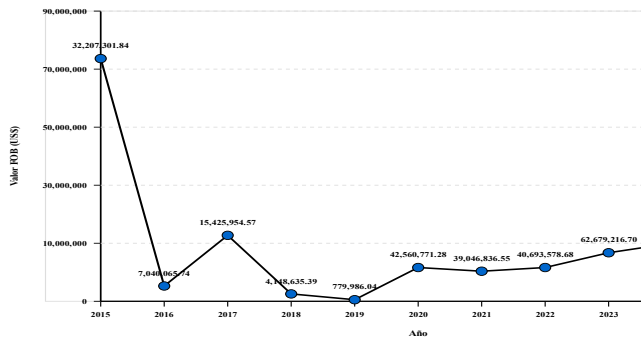


Fig. 1 Evolución de las exportaciones de espárragos peruanos (2015-2024).

En la Fig. 2. Se observa la evolución de las exportaciones de palta del 2014 al 2023 en valores FOB(US\$).

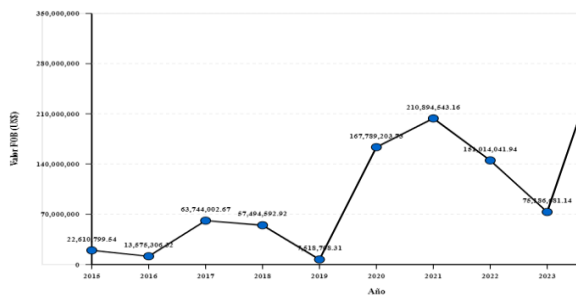


Fig. 2 Evolución de las exportaciones de palta peruana (2016-2024).

En cuanto a las exportaciones de arroz del 2014 al 2023 en valores FOB(US\$) se aprecian en la Fig. 3.

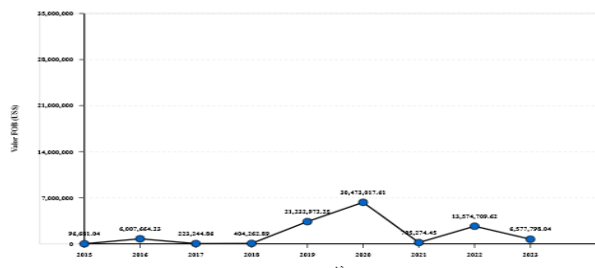


Fig. 3 Evolución de las exportaciones de arroz peruano (2015-2023).

El artículo se estructura de la siguiente manera: la primera sección establece el contexto y la brecha de investigación; la segunda sección presenta una revisión exhaustiva de la literatura y desarrolla las hipótesis; la tercera sección detalla la metodología, incluyendo las variables de estudio y el análisis de datos; la cuarta sección expone los resultados empíricos; y la quinta sección concluye con implicaciones para políticas públicas y recomendaciones para investigaciones futuras.

A. Marco Teórico del Agua Virtual y Comercio Agrícola

El concepto de agua virtual, introducido por Allan en 1993, ha evolucionado hasta convertirse en un paradigma fundamental para entender los flujos globales de recursos hídricos [10]. Este marco teórico propone que el comercio de productos agrícolas representa, en esencia, una transferencia indirecta de recursos hídricos entre regiones, estableciendo así una nueva dimensión en la economía del agua y el comercio internacional.

La teoría del agua virtual se sustenta en tres pilares conceptuales fundamentales:

Eficiencia en la Asignación de Recursos Hídricos:

La literatura sugiere que el comercio de agua virtual puede optimizar la distribución global de recursos hídricos [11]. Sin embargo, estudios empíricos revelan que los patrones actuales de comercio frecuentemente contradicen esta premisa, como se evidencia en la exportación de productos intensivos en agua desde regiones con escasez hídrica.

Ventaja Comparativa Hídrica:

Contrariamente a la teoría económica tradicional, países con limitaciones hídricas como Perú, México y Chile han desarrollado ventajas comparativas en la producción de cultivos intensivos en agua [12]. Este fenómeno desafía los principios convencionales de la especialización internacional basada en la dotación de recursos.

Sostenibilidad y Seguridad Hídrica:

El marco teórico actual incorpora consideraciones de sostenibilidad ambiental y seguridad hídrica [12]. La literatura reciente enfatiza la necesidad de equilibrar los beneficios económicos del comercio agrícola con la preservación de recursos hídricos locales, especialmente en regiones con estrés hídrico.

La evidencia empírica demuestra que el comercio agrícola internacional moviliza aproximadamente 2,800 km³ de agua virtual anualmente [13]. En el contexto latinoamericano, este comercio representa el 23% del total global, con una tendencia creciente que plantea desafíos significativos para la gestión sostenible de recursos hídricos en la región.

B. Sostenibilidad y Políticas Hídricas

La gestión sostenible del agua en la agricultura de

exportación emerge como uno de los desafíos más críticos para la seguridad alimentaria global contemporánea. Las investigaciones recientes han revelado una preocupante realidad en las prácticas de riego agrícola, donde aproximadamente el 40% de la producción alimentaria mundial depende de métodos insostenibles [14]. Esta situación se agudiza particularmente en América Latina, donde la agricultura consume el 70% de las extracciones de agua dulce, operando con tasas de eficiencia inferiores al 45% [15]. El caso peruano resulta especialmente alarmante, pues el sector agrícola exportador utiliza hasta el 85% del agua dulce disponible en el país.

La sobreexplotación de recursos hídricos para fines agrícolas ha desencadenado una serie de efectos negativos en cascada sobre los ecosistemas. Los estudios han documentado una reducción significativa del 30% en los caudales ecológicos de los principales ríos, junto con la degradación de más del 50% de los humedales asociados a zonas agrícolas. Estos cambios han provocado alteraciones sustanciales en los ciclos hidrológicos locales [16], comprometiendo la integridad de los ecosistemas acuáticos y terrestres.

En respuesta a esta problemática, los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente el ODS 6 y el ODS 12, han impulsado el desarrollo de políticas hídricas innovadoras. Estas iniciativas se han materializado en dos vertientes principales. Por un lado, las políticas de eficiencia han promovido la implementación de sistemas de riego tecnificado, el monitoreo digital del consumo hídrico y la creación de incentivos para adoptar tecnologías de ahorro de agua [17]. Por otro lado, la gestión integrada ha introducido medidas como el establecimiento de cuotas de extracción por cuenca, programas de restauración de ecosistemas acuáticos y el desarrollo de mercados de derechos de agua [18].

La evidencia empírica sugiere resultados prometedores en la implementación de estas políticas. Los estudios indican que una aplicación efectiva de estas medidas podría lograr una reducción del 30% en el consumo de agua agrícola sin comprometer significativamente la productividad. En el contexto latinoamericano, esto representaría un ahorro potencial de 2,000 millones de metros cúbicos anuales [19], cifra que subraya la importancia crucial de adoptar y mantener estas políticas de gestión sostenible del agua.

C. Agua Virtual y Dinámica de las Exportaciones Agrícolas

El análisis de la relación entre agua virtual y exportaciones agrícolas revela patrones complejos de interdependencia global que merecen especial atención. Los estudios empíricos han demostrado que la integración en mercados globales genera un efecto dual significativo: por un lado, se observa un incremento promedio del 15-20% en el crecimiento económico del sector agrícola; por otro, se evidencia un aumento del 25-30% en la utilización de recursos hídricos locales [20]. Esta dinámica plantea

importantes cuestionamientos sobre la sostenibilidad del modelo actual de comercio agrícola internacional.

La investigación actual ha revelado una paradoja significativa en los patrones de comercio internacional del agua virtual. Contra intuitivamente, países que enfrentan escasez hídrica como Perú, México y Chile se han convertido en importantes exportadores de productos intensivos en agua, mientras que naciones con abundancia hídrica como Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea figuran como principales importadores. Este fenómeno se materializa en una estadística reveladora: aproximadamente el 60% del comercio de agua virtual fluye desde regiones con estrés hídrico hacia zonas con abundancia de agua [21]. Esta dinámica ha generado impactos significativos en los recursos locales, manifestándose en la sobreexplotación de acuíferos, la reducción de la disponibilidad hídrica para consumo local y la alteración de ecosistemas naturales [22].

El análisis de sostenibilidad del comercio de agua virtual revela preocupaciones significativas tanto en el ámbito ambiental como económico. En términos ambientales, se observa un progresivo agotamiento de las reservas hídricas subterráneas, acompañado de procesos de salinización en suelos agrícolas y una notable pérdida de biodiversidad en ecosistemas acuáticos [23]. Paralelamente, en el aspecto económico, se identifican riesgos sustanciales relacionados con la vulnerabilidad ante cambios climáticos, una creciente dependencia de mercados externos y el incremento sostenido en los costos de extracción de agua [24]. Estos factores subrayan la necesidad imperante de repensar las estrategias actuales de comercio agrícola internacional desde una perspectiva de sostenibilidad integral.

Basados en esta evidencia empírica, se formulan las siguientes hipótesis:

Hipótesis General:

H₁: Existe un impacto significativo entre el agua virtual y el volumen de exportaciones de arroz, espárrago y palta peruana.

Hipótesis Específicas:

H₂: La huella hídrica azul tiene un impacto significativo en las exportaciones de arroz, espárrago y palta peruana.

H₃: La huella hídrica verde tiene un impacto significativo en las exportaciones de arroz, espárrago y palta peruana.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con diseño no experimental, longitudinal y correlacional, orientado a analizar la relación entre el agua virtual y las exportaciones agrícolas peruanas durante el período 2014-2023. El estudio se centró específicamente en tres productos: arroz, espárrago y palta, que representan

productos convenientes para exportaciones agrícolas peruanas.

La población de estudio comprende todas las exportaciones agrícolas peruanas registradas entre 2014-2023. Se empleó un muestreo no probabilístico, seleccionando específicamente las exportaciones de arroz, espárrago y palta debido a su representatividad en el sector y su intensivo uso de recursos hídricos.

Para el análisis se consideraron dos variables principales. La variable independiente, agua virtual, se operacionalizó mediante dos dimensiones: huella hídrica azul y huella hídrica verde. La variable dependiente, exportaciones agrícolas, se midió a través del volumen de exportaciones de cada producto seleccionado.

La recolección de datos se realizó mediante un exhaustivo análisis documental de registros oficiales, utilizando múltiples fuentes gubernamentales. Los datos de exportaciones agrícolas se obtuvieron del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), mientras que la información sobre recursos hídricos provino del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Adicionalmente, se incorporaron datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Comité de Comercio Exterior (COMEX) para validar y complementar la información.

El análisis de datos se desarrolló en dos etapas. En la primera, se realizó un análisis descriptivo para caracterizar las tendencias y patrones en las exportaciones y el uso de agua virtual. La segunda etapa consistió en un análisis inferencial, empleando el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar la relación entre variables y análisis de regresión lineal simple, con 5% de significancia y 95% de confianza, para determinar el impacto del agua virtual en las exportaciones.

El procedimiento metodológico siguió una secuencia sistemática que incluyó la recopilación y depuración de datos, el cálculo de huellas hídricas específicas para cada producto, el análisis de correlaciones, la validación de hipótesis y la interpretación de resultados. Este proceso permitió mantener el rigor científico necesario para garantizar la validez y confiabilidad de los hallazgos.

III.. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la relación entre el agua virtual y las exportaciones agrícolas peruanas durante el período 2014-2023 reveló hallazgos significativos para los tres productos estudiados.

A. Análisis del Arroz

Se observa el estudio del arroz mostró una correlación positiva significativa ($r = 0.915$, $p < 0.001$) entre el agua virtual y el volumen de exportaciones. El modelo de regresión explicó el 83% de la varianza ($R^2 = 0.83$, $F = 41.049$), indicando una fuerte relación predictiva. El análisis

de la huella hídrica del arroz, basado en los datos recopilados de SENAMHI y MIDAGRI durante el período 2014-2023, mostró variaciones significativas, con un promedio de 1,580.9 litros por kilogramo. Los valores fluctuaron entre un mínimo de 1,025 litros/kg (2020) y un máximo de 2,325 litros/kg (2016), reflejando la variabilidad en las condiciones hídricas y las prácticas de cultivo durante el período estudiado.

En la tabla I, se especifica el resumen del modelo de exportación de arroz.

TABLA I
RESUMEN DEL MODELO EXPORTACIÓN DE ARROZ

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error standard estimado |
|--|------|------------|---------------------|-------------------------|
| 1 | ,915 | ,837 | ,817 | 116.0959 |
| a. Predictores: (Constante), agua virtual | | | | |
| b. Variable dependiente: exportación de Arroz. | | | | |

En ese sentido, la tabla II, se describe el análisis de varianza para la exportación de arroz.

TABLA II
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA EXPORTACIÓN DE ARROZ

| Modelo | Suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F | Sig. | |
|---|-------------------|------------|----------------|------------|--------|-------|
| 1 | Regresión | 553217.407 | 1 | 553217,407 | 41,049 | <,001 |
| | Residuo | 107816.193 | 8 | 13477,024 | | |
| | Total | 661033.600 | 9 | | | |
| a. Variable dependiente: Exportaciones de Arroz | | | | | | |
| b. Predictores: (Constante),: Agua Virtual | | | | | | |

De igual manera, los coeficientes del modelo de regresión para la exportación de arroz se aprecian en la Tabla III.

TABLA III
COEFICIENTES DEL MODELO DE REGRESIÓN PARA EXPORTACIÓN DE ARROZ

| Modelo | Coeficientes no estandarizados | | Coeficientes estandarizados | t | Sig. | |
|---|--------------------------------|----------------|-----------------------------|------|--------|------|
| | B | Error estándar | Beta | | | |
| 1 | (Constante) | 751,569 | 142,401 | | -5,278 | ,001 |
| | Exportación de Arroz | 0,148 | ,023 | ,915 | -6,410 | ,001 |
| a. Variable dependiente: exportación de arroz | | | | | | |

$$Y = 7,52E2 + 0,15X$$

B. Análisis del Espárrago

Para el espárrago, se encontró una correlación aún más fuerte ($r = 0.937$, $p < 0.001$) entre el agua virtual y las exportaciones. El modelo explicó el 87% de la varianza ($R^2 = 0.87$, $F = 57.912$). En cuanto al espárrago, el análisis de la huella hídrica basado en datos de SENAMHI y MIDAGRI (2014-2023) mostró fluctuaciones significativas. Los valores oscilaron entre 202 litros/kg (2020) y 1,557 litros/kg (2017), con un promedio de 1,061.5 litros/kg durante el período estudiado. Esta variabilidad refleja no solo las condiciones climáticas cambiantes, sino también las diferentes prácticas de riego implementadas en las principales zonas productoras. Es importante señalar que estos datos provienen directamente de los registros históricos de consumo hídrico en las zonas de cultivo, proporcionando una base empírica sólida para el análisis de la sostenibilidad hídrica en la producción de espárragos.

La Tabla IV, se observa el modelo de exportación de espárrago.

TABLA IV
RESUMEN DEL MODELO EXPORTACIÓN DE ESPARRAGO

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error standard estimado |
|--|------|------------|---------------------|-------------------------|
| 1 | ,937 | ,879 | ,863 | 161.65827 |
| a. Predictores: (Constante), agua virtual | | | | |
| b. Variable dependiente: exportación de Espárrago. | | | | |

El análisis de varianza para la exportación de espárrago, se señalan en la tabla V.

TABLA V
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA EXPORTACIÓN DE ESPARRAGO

| Modelo | Suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F | Sig. | |
|---|-------------------|-------------|----------------|-------------|--------|-------|
| 1 | Regresión | 1513433,326 | 1 | 1513433,326 | 57,912 | <,001 |
| | Residuo | 209067,174 | 8 | 26133,397 | | |
| | Total | 1722500,500 | 9 | | | |
| a. Variable dependiente: Exportaciones de Espárrago | | | | | | |
| b. Predictores: (Constante), Agua Virtual | | | | | | |

Los coeficientes del modelo de regresión para la exportación de espárrago se aprecian en la tabla VI

TABLA VI
COEFICIENTES DEL MODELO DE REGRESIÓN PARA EXPORTACIÓN DE ESPARRAGO

| Modelo | Coeficientes no estandarizados | | Coeficientes estandarizados | t | Sig. | |
|---|--------------------------------|----------------|-----------------------------|------|--------|------|
| | B | Error estándar | Beta | | | |
| 1 | (Constante) | 50,560 | 142,341 | | -0,355 | ,732 |
| | Exportación de Arroz | 0,076 | ,010 | ,937 | -7,610 | ,001 |
| a. Variable dependiente: exportación de arroz | | | | | | |

$$Y = 50,56 + 0,08x$$

C. Análisis de la Palta

La palta presentó resultados igualmente significativos, con una correlación de $r = 0.916$ ($p < 0.001$) entre el agua virtual y las exportaciones. El modelo explicó el 83% de la varianza ($R^2 = 0.83$, $F = 41.844$). Para la palta, el análisis de la huella hídrica, fundamentado en los registros de SENAMHI y MIDAGRI durante el período 2014-2023, reveló el patrón más variable de los tres cultivos estudiados. Los datos muestran un rango significativo que va desde 1,090 litros/kg (2014) hasta 5,830 litros/kg (2023), con un promedio de 2,929.3 litros/kg. Está marcada variabilidad podría atribuirse a cambios en las condiciones climáticas, modificaciones en las prácticas de cultivo y la expansión de áreas de producción durante la década analizada. Los datos evidencian una tendencia creciente en el consumo hídrico, lo que sugiere la necesidad de implementar estrategias más eficientes en el uso del agua para este cultivo.

La tabla VII, se muestra se presenta el modelo del resumen del modelo de exportación de palta.

TABLA VII
RESUMEN DEL MODELO EXPORTACIÓN DE PALTA

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error standard estimado |
|--|------|------------|---------------------|-------------------------|
| 1 | ,916 | ,839 | ,819 | 513,80660 |
| a. Predictores: (Constante), agua virtual | | | | |
| b. Variable dependiente: exportación de Palta. | | | | |

El análisis de la varianza para la exportación de la palta se indica en la tabla VIII.

TABLA VIII
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA
EXPORTACIÓN DE PALTA

| Modelo | Suma de cuadrados | df | Cuadrado medio | F | Sig. | |
|---|-------------------|--------------|----------------|-------------|--------|-------|
| 1 | Regresión | 11046626,302 | 1 | 11046626,02 | 41,844 | <,001 |
| | Residuo | 2111977,798 | 8 | 263997,225 | | |
| | Total | 13158604,100 | 9 | | | |
| a. Variable dependiente: Exportaciones de Palta | | | | | | |
| b. Predictores: (Constante), Agua Virtual | | | | | | |

La tabla IX, se observan los coeficientes del modelo de regresión para la exportación de palta.

TABLA IX
COEFICIENTES DEL MODELO DE REGRESIÓN
PARA EXPORTACIÓN DE PALTA

| Modelo | Coeficientes no estandarizados | | Coeficientes estandarizados | t | Sig. | |
|---|--------------------------------|----------------|-----------------------------|------|-------|------|
| | B | Error estándar | Beta | | | |
| 1 | (Constante) | 286,748 | 454,042 | | 0,632 | ,545 |
| | Exportación de Arroz | 0,073 | ,0110 | ,916 | 6,469 | ,001 |
| a. Variable dependiente: Exportación de Palta | | | | | | |

$$Y = 2,87E2 + 0,07x$$

D. Análisis Comparativo

El análisis comparativo de los tres cultivos estudiados reveló patrones significativos en términos de eficiencia hídrica, tendencias temporales e implicaciones regionales. En cuanto a la eficiencia hídrica, los datos muestran que el arroz presenta el mayor consumo promedio de agua (1,580.9 litros/kg), seguido por el espárrago (1,061.5 litros/kg). Sin embargo, es notable que la palta, a pesar de su alto consumo promedio (2,929.3 litros/kg), muestra la mejor eficiencia cuando se considera el valor comercial generado por unidad de agua utilizada, lo que sugiere una mayor rentabilidad en términos de uso del recurso hídrico.

Las tendencias temporales durante el período 2014-2023 evidencian un patrón consistente de crecimiento en las exportaciones de los tres productos. Este incremento en el volumen de exportaciones ha sido acompañado por un aumento proporcional en el consumo de agua virtual, aunque se observan mejoras marginales en la eficiencia del uso del

agua a lo largo de los años. Estas mejoras pueden atribuirse a la implementación gradual de tecnologías de riego más eficientes y a la adopción de prácticas agrícolas más sostenibles.

El análisis regional revela características distintivas en el uso del agua según la zona de producción. Las variaciones observadas responden principalmente a las condiciones hidrológicas específicas de cada región productora. Por ejemplo, mientras que las zonas costeras dependen mayormente de sistemas de riego tecnificado, las regiones con mayor precipitación muestran un aprovechamiento más significativo del agua de lluvia. Estas diferencias regionales se reflejan en las variaciones estacionales de la eficiencia hídrica, sugiriendo la necesidad de estrategias de gestión del agua adaptadas a las condiciones locales.

Los resultados obtenidos confirman las hipótesis planteadas sobre la existencia de una relación significativa entre el agua virtual y las exportaciones agrícolas peruanas. La correlación positiva encontrada en los tres cultivos ($r > 0.90$) subraya la importancia crítica de la gestión eficiente del agua en el sector agroexportador, especialmente considerando las proyecciones de crecimiento del sector y los desafíos que plantea el cambio climático.

Los hallazgos de esta investigación dialogan de manera significativa con la literatura existente sobre agua virtual y comercio agrícola. La fuerte correlación encontrada entre el agua virtual y las exportaciones agrícolas peruanas coincide con los estudios de Schwarz et al. (2019) [20], quienes también identificaron una relación directa entre la integración en mercados globales y el uso intensivo de recursos hídricos. Sin embargo, nuestros resultados revelan particularidades importantes en el contexto peruano: mientras que estudios previos en otros países latinoamericanos reportan eficiencias hídricas relativamente estables, nuestros datos muestran variaciones significativas entre cultivos y regiones.

La tendencia creciente en el consumo de agua virtual observada en los tres cultivos estudiados plantea interrogantes importantes sobre la sostenibilidad del modelo agroexportador actual. Estos hallazgos respaldan las preocupaciones expresadas por Rosa et al. (2019) [22] sobre la dependencia de prácticas de riego insostenibles en la agricultura de exportación. No obstante, las mejoras marginales en eficiencia hídrica detectadas en nuestro estudio sugieren que existe potencial para optimizar el uso del agua mediante la implementación de tecnologías y prácticas agrícolas más eficientes.

Un aspecto particularmente relevante de nuestros hallazgos es la paradoja identificada en la distribución del agua virtual: los cultivos estudiados muestran patrones de consumo hídrico que varían significativamente según la región y la temporada, lo que contrasta con la tendencia

homogénea reportada en estudios previos. Esta variabilidad sugiere la necesidad de desarrollar políticas hídricas más específicas y adaptadas a las condiciones locales, en línea con las recomendaciones de los Objetivos de Desarrollo Sostenible [30].

IV.CONCLUSIÓN

Esta investigación proporciona evidencia empírica significativa sobre la relación entre el agua virtual y las exportaciones agrícolas peruanas durante el período 2014-2023. Los resultados demuestran una correlación positiva y significativa entre el agua virtual y el volumen de exportaciones para los tres productos estudiados, con coeficientes de correlación superiores a 0.90. El análisis detallado de la huella hídrica reveló patrones distintivos para cada cultivo: el arroz mostró un promedio de 1,580.9 litros/kg, el espárrago 1,061.5 litros/kg, y la palta 2,929.3 litros/kg, evidenciando la intensidad variable en el uso del agua según el tipo de cultivo. Estos hallazgos subrayan la necesidad crítica de implementar políticas de gestión hídrica más eficientes y específicas para cada región productora, considerando las características particulares de cada cultivo y las condiciones hidrológicas locales. La investigación también destaca la importancia de equilibrar los objetivos de crecimiento económico del sector agroexportador con la sostenibilidad de los recursos hídricos, especialmente en un contexto de cambio climático y creciente estrés hídrico. Se recomienda para futuras investigaciones profundizar en el análisis de tecnologías de riego eficientes y en el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático específicas para cada región productora.

REFERENCIAS

- [1] Banco Mundial. "Agua", Jul. 2023. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>.
- [2] Gobierno del Perú. "Perú: alto riesgo de vulnerabilidad debido a crisis del agua", Ene. 2023. <https://www.gob.pe/institucion/ceplan/noticias/690049-peru-alto-riesgo-de-vulnerabilidad-debido-a-crisis-del-agua>.
- [3] S. Tamea, F. Laio y L. Ridolfi. "Global effects of local food-production crises: a virtual water perspective", Ene. 2016.
- [4] J. Allan. "Natural Resources Management in the Wake of Neoliberalism". 1993.
- [5] Banco Central de Reserva del Perú. "El gran crecimiento de las exportaciones peruanas en estas dos décadas" 2024
- [6] V. Novoa et al. "Water footprint and virtual water flows from the Global South: Foundations for sustainable agriculture in periods of drought". 2023.
- [7] R. Singh y D. Horne. "Water-quality issues facing dairy farming: potential natural and built attenuation of nitrate losses in sensitive agricultural catchments". *Animal Production Science*, vol. 60, no. 1, pp. 67-77, Ene. 2019.
- [8] T. Gleeson et al. "The Water Planetary Boundary: Interrogation and Revision", vol. 2, no. 3, pp. 223-234, Mar. 2020.
- [9] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. "Huella Hídrica del Perú", Feb. 2015.
- [10] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). "Se identificaron 10 episodios de sequías severas en el Perú en los últimos 37 años", Jun. 2019.
- [11] A. Hoekstra. "Virtual Water Trade: Proceedings of the international meeting on virtual water trade". 2003.
- [12] A. Hokestra. "The Water Footprint of Food". University of Twente, Holanda. 2005.
- [13] Global Omnium. "Los tipos de agua y la medición de la Huella Hídrica". 2023.
- [14] Consejo Nacional del Agua. "Juntos hacemos del agua una prioridad global". 2018.
- [15] Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo. "Agua que no vemos", Dic. 2021.
- [16] R. Qasim, S. Shaba y A. Abdullah. "Plant Archives", vol. 20, no. 1, pp. 164-171. 2020.
- [17] Resources Group 2030. "WRG: Collective Action on Water Security for People, Environment, and Economy". 2023.
- [18] Instituto Nacional de Estadística e Informática. "Volumen total exportado creció 5,6% durante el año 2018". 2018.
- [19] L. Nahuelhual et al. "Opportunities and limits to ecosystem services governance in developing countries and indigenous territories: The case of water supply in Southern Chile". *Environmental Science & Policy*, vol. 86, pp. 11-18, Ago. 2018.
- [20] J. Schwarz, E. Mathijs y M. Maertens. "A dynamic view on agricultural trade patterns and virtual water flows in Peru". *Science of The Total Environment*, vol. 683, no. 15, pp. 719-728, Sep. 2019.
- [21] R. Sommaruga. "Avocado Production: Water Footprint and Socio-economic Implications", Dic. 2020.
- [22] L. Rosa, D. Danilo, T. Chengyi, M. Rulli y P. D'Odorico. "Global unsustainable virtual water flows in agricultural trade", Oct. 2019.
- [23] Banco Central de Reserva del Perú. "El gran crecimiento de las exportaciones peruanas en estas dos décadas". 2019.
- [24] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista. "Metodología de la investigación". México: McGraw-Hill Interamericana, vol. 4, pp. 310-386. 2018.