

**ARTÍCULO ORIGINAL**

Uso de IA en riesgo cardiovascular

**Uso de herramientas de IA para predecir rigidez arterial en poblaciones con factores de riesgo cardiovascular***Using AI tools to predict arterial stiffness in populations with cardiovascular risk factors*Cintia Galli<sup>1</sup>, Lucrecia Loprete<sup>2</sup>, Gonzalo García<sup>3</sup>, Parag Chatterjee<sup>3</sup>, Leandro Cymberknop<sup>3</sup>, Ricardo Armentano<sup>3</sup>, Alejandra Celenza<sup>4</sup>

1) Ingeniería Cardiovascular, Facultad Regional Buenos Aires Universidad Tecnológica Nacional, Regional Buenos Aires, Argentina. Edad Vascular Hospital Santojanni, CABA

2) Cesación tabáquica Hospital Santojanni, CABA.

3) Ingeniería Cardiovascular, Facultad Regional Buenos Aires Universidad Tecnológica Nacional, Regional Buenos Aires, Argentina.

4) Consultorios externos Hospital Santojanni, CABA.

Recibido en su forma original: 27 de febrero de 2025

En su forma corregida: 07 de mayo de 2025

Aceptación final: 11 de mayo de 2025

Cintia Nora Galli

Ingeniería Cardiovascular, Facultad Regional Buenos Aires Universidad Tecnológica Nacional, Regional Buenos Aires, Argentina. Edad Vascular Hospital Santojanni, Capital Federal, Argentina.

ORCID: 0000-0001-5954-4588

E-mail: [cngalli@gmail.com](mailto:cngalli@gmail.com)**ABSTRACT**

**Introduction:** Smoking is a well-established cardiovascular risk factor that contributes to arterial stiffness, accelerating processes such as atherosclerosis. Pulse wave velocity (PWV) is a noninvasive measure that reflects vascular health and helps to detect subclinical damage. **Objectives:** To describe the variables associated with PWV in the study population, evaluate its association with smoking and ex-smoking, and use machine learning (ML) techniques to identify complex associations not evident in conventional statistical analyses. **Materials and Methods:** A descriptive cross-sectional study was conducted in the vascular age and smoking cessation clinic of Santojanni Hospital. PWV was measured in 136 patients, analyzing clinical and demographic variables, emphasizing current or past smoking history. **Results:** PWV showed a positive correlation mainly with age, chronic kidney disease (CKD), and arterial hypertension (AH). Although no significant differences were found between smokers and non-smokers initially, when excluding comorbidities such as hypertension and CKD, smokers and ex-smokers were found to have significantly higher PWV. The use of machine learning identified that, although hypertension and CKD are important factors, the number of pack years and age influenced arterial stiffness more. **Conclusions:** The study highlights the detrimental effects of smoking on vascular health and the usefulness of PWV in assessing cardiovascular risk. ML techniques allowed the identification of complex interactions, revealing that smoking amplifies the impact of other risk factors. Smoking cessation could improve PWV, reinforcing the importance of continuous monitoring to prevent cardiovascular events.

**Keywords:** Arterial stiffness; chronic kidney disease; smoking; machine learning

## RESUMEN

**Introducción:** El tabaquismo es un factor de riesgo cardiovascular bien establecido, que contribuye a la rigidez arterial, acelerando procesos como la aterosclerosis. La velocidad de onda de pulso (VOP) es una medida no invasiva que refleja la salud vascular y es útil para detectar daños subclínicos. **Objetivos:** Describir las variables asociadas a la VOP en la población estudiada, evaluar su asociación con el tabaquismo y ex tabaquismo, y utilizar técnicas de aprendizaje automático (AA) para identificar asociaciones complejas no evidentes en los análisis estadísticos convencionales. **Materiales y Métodos:** Se realizó un estudio descriptivo de corte transversal en el consultorio de edad vascular y de cesación tabáquica del Hospital Santojanni. Se midió la VOP en 136 pacientes, analizando variables clínicas y demográficas, con énfasis en el antecedente de tabaquismo actual o pasado. **Resultados:** La VOP mostró una correlación positiva principalmente con la edad, la enfermedad renal crónica (ERC) y la hipertensión arterial (HTA). Aunque no se encontraron diferencias significativas entre fumadores y no fumadores inicialmente, al excluir comorbilidades como HTA y ERC, se observó que los tabaquistas y ex tabaquistas tenían una VOP significativamente mayor. El uso de aprendizaje automático identificó que, aunque la HTA y la ERC son factores importantes, el número de pack years y la edad influyeron más en la rigidez arterial. **Conclusiones:** El estudio resalta los efectos perjudiciales del tabaquismo sobre la salud vascular y la utilidad de la VOP para evaluar el riesgo cardiovascular. Las técnicas de AA permitieron identificar interacciones complejas, revelando que el tabaquismo amplifica el impacto de otros factores de riesgo. La cesación tabáquica podría mejorarla VOP, reforzando la importancia de un monitoreo continuo para prevenir eventos cardiovasculares.

**Palabras clave:** Rigidez arterial; enfermedad renal crónica; tabaquismo; machine learning

## INTRODUCCIÓN

El tabaquismo es uno de los principales factores de riesgo cardiovascular (FRCV) a nivel global, y su impacto sobre el sistema vascular ha sido ampliamente documentado <sup>(1)</sup>. El consumo de tabaco genera múltiples alteraciones en la pared arterial, resultando en una pérdida progresiva de elasticidad y un incremento en la rigidez arterial. Este proceso contribuye al desarrollo y aceleración de la aterosclerosis, afectando la capacidad de las arterias para distenderse y contraerse con cada latido cardíaco. La rigidez arterial incrementa la resistencia periférica, elevando la presión arterial y generando una mayor sobrecarga cardíaca, predisponiendo a los pacientes a enfermedades como hipertensión, insuficiencia cardíaca y eventos cardiovasculares graves, como infarto de miocardio y accidente cerebrovascular <sup>(2)</sup>.

La velocidad de onda de pulso (VOP) es un marcador confiable y no invasivo de rigidez arterial, considerado uno de los mejores indicadores disponibles para la evaluación precoz del daño vascular subclínico <sup>(3)</sup>. Se define como la velocidad a la que se propaga una onda de presión a través del árbol arterial y está directamente relacionada con la elasticidad de las paredes arteriales <sup>(4)</sup>. Cuanto más rígidas son las arterias, mayor es la velocidad de propagación de la onda de pulso. En comparación con métodos tradicionales de evaluación del RCV, la VOP tiene la ventaja de ser una técnica sencilla, reproducible y aplicable en diversas poblaciones, incluyendo fumadores <sup>(5)</sup>. La VOP permite detectar alteraciones tempranas en la pared arterial, incluso antes de que se manifiesten otros signos clínicos de enfermedad cardiovascular <sup>(6)</sup>.

Diversos estudios han demostrado que el tabaco ejerce un efecto directo sobre la función endotelial y la estructura arterial, favoreciendo la inflamación crónica, la disminución de óxido nítrico y la formación de placas ateroscleróticas, contribuyendo al aumento de la rigidez arterial <sup>(7)</sup>. Estos efectos pueden medirse eficazmente mediante la VOP, utilizada en estudios previos para evaluar el impacto del tabaquismo en la rigidez arterial en diferentes grupos poblacionales. En fumadores, la VOP tiende a estar significativamente alterada debido a los cambios vasculares inducidos por el tabaco, lo que subraya su utilidad como herramienta diagnóstica y de estratificación del RCV <sup>(8)</sup>. Por lo tanto, la medición de la VOP en fumadores puede proporcionar información crucial sobre la salud arterial y la edad vascular, reflejando el daño acumulado causado por el tabaquismo.

Este estudio propone evaluar las asociaciones entre tabaquismo, otras variables clínicas y demográficas, y la rigidez arterial medida a través de la VOP, con el objetivo de identificar posibles FR no tradicionales. Asimismo,

se explora la utilidad de técnicas de aprendizaje automático (AA) para mejorar la precisión en la predicción de la rigidez arterial y el RCV en fumadores.

Además, este trabajo busca incorporar herramientas de inteligencia artificial (IA) y AA, cada vez más frecuentes en la práctica médica. Mediante estas técnicas avanzadas, es posible encontrar asociaciones ocultas que pueden no ser evidentes con métodos estadísticos tradicionales, como pruebas de hipótesis o modelos de regresión. Este enfoque allana el camino hacia una medicina de precisión, donde la toma de decisiones clínicas se basa en un análisis de datos más profundo y personalizado, permitiendo así una identificación y gestión de riesgos más efectiva y adaptada a las características individuales de los pacientes.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivos Primarios**

- 1) Describir las variables clínicas y demográficas asociadas a la VOP en la población estudiada.
- 2) Evaluar si existe una asociación entre el antecedente de tabaquismo y ex tabaquismo con los valores de la VOP.

### **Objetivo Secundario**

- 1) Desarrollar un pipeline de AA (Machine Learning (ML)) para identificar nuevas asociaciones entre las distintas variables clínicas y demografías y la VOP.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Diseño del Estudio**

Se llevó a cabo un estudio descriptivo y de corte transversal entre marzo y agosto de 2024 en consultorios de Edad Vasculardel Hospital Santojanni. Se realizaron 136 mediciones de VOP a pacientes derivados del consultorio de Cesación Tabáquica (n=65) y pacientes propios de Edad Vasculardel Hospital Santojanni (n=71). Las mediciones incluyeron la velocidad de onda de pulso carotídeo-femoral derecha (CFD) e izquierda (CFI), utilizando un método estandarizado y validado para evaluar rigidez arterial.

### **Criterios de Inclusión**

- Pacientes mayores de 18 años derivados del consultorio de cesación tabáquica.
- Pacientes mayores de 18 años derivados al consultorio de Edad Vasculardel Hospital Santojanni con antecedentes de tabaquismo.

### **Criterios de Exclusión:**

- Presencia de arritmia al momento de la medición.
- Imposibilidad de medir la VOP por razones clínicas, como obesidad severa o amputaciones.

### **Procedimiento**

Las mediciones de VOP se realizaron mediante tonometría de alta precisión, un método no invasivo que evalúa la rigidez arterial en las arterias carótida y femoral. Se recogieron datos clínicos y demográficos, como edad, índice de masa corporal (IMC), hipertensión arterial (HTA), enfermedad renal crónica (ERC), dislipemia (DLP) y hábitos tabáquicos (TBQ).

Para el análisis estadístico, se emplearon pruebas adecuadas a cada variable. Para variables continuas con distribución normal, se utilizó la prueba t de Student para comparaciones de medias; para variables no paramétricas, la prueba de Mann-Whitney, se expresaron los resultados como media con su desvío estándar (ds) y mediana con el rango intercuartil (RIQ) respectivamente. Las correlaciones se evaluaron mediante coeficientes de Spearman y Pearson. La fuerza de asociación se midió a través del índice rho en el caso del coeficiente de Spearman, y mediante r para el coeficiente de Pearson.

Todos los análisis se realizaron con un nivel de significancia estadística de  $p < 0.05$ . Los datos fueron procesados en R y se utilizó Python para desarrollar los modelos de AA. Se probaron cinco modelos de regresión en el pipeline de ML para predecir la VOP CFI y CFD:

- Regresión Lineal Múltiple (RLM)
- Decisión Tree Regression (árbol de decisión)
- Random Forest Regression (RFR)
- Support Vector Regression
- Gradient Boosting Regression
- XGBoost Regression

La precisión de los modelos se expresó a través del Error Cuadrático Medio (MSE) y el coeficiente de determinación  $R^2$ .

### **Importancia de las características (Feature Importance -FI)**

La cuantificación de las variables que influyen en el modelo se calculó con Random Forest Regressor (RFR), que mide cuánto contribuye cada variable a reducir el error de predicción (MSE). Los valores están normalizados, sumando 1 o el 100%, reflejando la importancia relativa de cada característica. La desviación estándar (DS) del MSE indica la consistencia de las predicciones. Un MSE bajo con una DS pequeña sugiere un modelo preciso y estable.

## **RESULTADOS**

Se analizaron los datos de 136 pacientes atendidos en el consultorio de Edad Vascul ar del Hospital Santojanni, donde se midió la VOP CFD e CFI. A continuación, se describen las variables asociadas con la VOP en toda la base de pacientes, sin discriminar el estado de TBQ o ex TBQ.

La VOP CFD mostró un comportamiento no paramétrico, con una mediana de 13.29 m/s (RIQ 3.92), mientras que la VOP CFI se comportó como una variable paramétrica, con una media de 12.60 m/s (RIQ 3.95). A continuación, se describen las variables que modifican de manera estadísticamente significativa la VOP en función de los diferentes grupos de pacientes.

### **Edad**

La edad de los pacientes, una variable cuantitativa continua no paramétrica, presentó una mediana de 61.56 años (RIQ 16.64). Se encontró una correlación lineal positiva de leve a moderada entre la edad y la VOP CFD, con un coeficiente de Spearman ( $\rho$ ) de 0.48 ( $p < 0.05$ ). Para la VOP CFI, la correlación fue moderada, con un  $\rho$  de 0.53 ( $p < 0.05$ ).

### **IMC**

El IMC, una variable cuantitativa continua paramétrica, tuvo una media de 28.13  $\text{kg/m}^2$  (DS 6.16). Se observó una correlación lineal positiva leve entre el IMC y la VOP CFD ( $\rho = 0.18$ ,  $p < 0.05$ ), y entre el IMC y la VOP CFI ( $\rho = 0.20$ ,  $p < 0.05$ ).

### **Variab les hemodinámicas**

Todas las tensiones arteriales (TAS, TAD, TAM) mostraron una asociación estadísticamente significativa con la VOP CFD y CFI. La TAS fue la variable con mayor correlación, con un  $\rho$  de 0.44 para la CFD y 0.48 para la CFI. No se encontró una relación significativa entre la frecuencia cardíaca (FC) y las VOP.

### **Antecedentes personales**

## HTA

El 58% de los pacientes ( $n = 79$ ) tenía diagnóstico de HTA. Estos pacientes mostraron una VOP CFD significativamente más elevada que los pacientes no hipertensos (mediana de 13.95 m/s, RIQ 4.28 vs. 12.40 m/s, RIQ 3.11;  $p < 0.005$ ). La VOP CFI también fue mayor en los hipertensos (mediana de 14.37 m/s, RIQ 2.7 vs. 12.18 m/s, RIQ 2.7;  $p < 0.005$ ).

## Enfermedad Renal Crónica (ERC)

El 42% de los pacientes ( $n = 57$ ) tenía ERC. Estos pacientes presentaron una VOP CFD más elevada (mediana de 14.67 m/s, RIQ 4.13 vs. 12.50 m/s, RIQ 3.14;  $p < 0.005$ ), lo cual también se observó en la VOP CFI (mediana de 14.44 m/s, RIQ 4.85 vs. 12.36 m/s, RIQ 3.1;  $p < 0.005$ ).

## DLP

El 57% de los pacientes ( $n = 78$ ) presentó DLP. Estos pacientes tuvieron una VOP CFD significativamente mayor que los no DLP (mediana de 13.70 m/s, RIQ 3.98 vs. 12.13 m/s, RIQ 3.98;  $p < 0.05$ ). Sin embargo, no se encontró una diferencia significativa en la VOP CFI ( $p = 0.11$ ).

## Hiperuricemia

El 12% de los pacientes ( $n = 17$ ) tenía hiperuricemia. Estos pacientes presentaron una VOP CFI significativamente mayor que los normouricémicos (mediana de 15.10 m/s, RIQ 4 vs. 12.49 m/s, RIQ 4.02;  $p < 0.05$ ). No hubo diferencia significativa en la VOP CFD.

## TBQ

El 47% de los pacientes ( $n = 65$ ) había fumado alguna vez. De estos, 26 pacientes (19%) eran TBQ y 39 (28%) ex TBQ

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la VOP CFD (mediana de 11.89 m/s, RIQ 4.77 vs. 13.62 m/s, RIQ 3.55) ni en la VOP CFI (mediana de 11.99 m/s, RIQ 3.69 vs. 13.10 m/s, RIQ 4.08) entre los pacientes tabaquistas y no tabaquistas.

No se encontró una correlación lineal estadísticamente significativa entre los PYT de los TBQ y la VOP CFD o CFI. Test de Spearman:  $p = 0.62$  para CFD y  $p = 0.95$  para CFI, con asociaciones lineales positivas leves de 0.10 en CFD y asociación lineal negativa leve de 0.012 en CFI.

## Comparación entre TBQ y no TBQ

No se hallaron diferencias significativas en la edad, IMC ni tensiones arteriales (TAS, TAD, TAM) entre los grupos. Tampoco hubo diferencias en la proporción de hiperuricemia, DLP, ERC o HTA en este grupo de pacientes. Ver **Tabla 1**.

Al analizar a los pacientes TBQ y ex TBQ juntos, tampoco se encontraron diferencias significativas en la VOP CFD (mediana de 12.9 m/s, RIQ 4.08 vs. 13.72 m/s, RIQ 3.79) ni en la VOP CFI (mediana de 12.56 m/s, RIQ 3.39 vs. 12.84 m/s, RIQ 4.87) contra los pacientes que nunca habían fumado.

- La mediana de edad de los TBQ y ex TBQ fue de 65.18 años (RIQ 13.67) versus 60.27 años para los no TBQ (RIQ 17.45), sin diferencia estadísticamente significativa.
- El IMC promedio de los TBQ y ex TBQ fue de 28.21 kg/m<sup>2</sup> (DS 6.58) y de 27.72 kg/m<sup>2</sup> (DS 5.53) para los no tabaquistas, sin diferencia estadísticamente significativa.
- Tampoco hubo diferencias significativas en las TAS, TAD o TAM.
- La TAS en TBQ y ex TBQ fue de una mediana de 123.8 mm Hg (RIQ 22.9) versus 125.3 mm Hg (RIQ 31.66) con una  $p$  de 0.80.

No hubo diferencias significativas en la proporción de hiperuricemia y DLP.

Si se observó una diferencia estadísticamente significativa en la proporción de pacientes con ERC y una tendencia estadística en la proporción de pacientes con HTA entre los TBQ y ex TBQ versus los no tabaquistas:

- ERC en TBQ y ex TBQ: 29% (19 de 65) versus 53% (37 de 69) en no tabaquistas ( $p = 0.007$ )
- HTA en TBQ y ex TBQ: 49% (32 de 65) versus 65% (45 de 69) en no tabaquistas. ( $p = 0.08$ )

Al excluir a los pacientes con ERC y HTA de ambos grupos, se encontró que los pacientes TBQ y ex TBQ tenían una VOP CFD significativamente mayor (mediana de 12.50 m/s, RIQ 4.05 vs. 10.75 m/s, RIQ 3.38;  $p = 0.03$ ) y una VOP CFI significativamente mayor (mediana de 12.43 m/s, RIQ 2.54 vs. 10.52 m/s, RIQ 2.69;  $p = 0.03$ ) en comparación con los pacientes que nunca fumaron.

**Tabla 1:** Características basales de pacientes TBQ y ex TBQ vs pacientes no TBQ

	TBQ y ex TBQ	No TBQ	p
<b>VOP CFD</b>	12.91 (4.08)	13.72 (3.79)	0.66
<b>VOP CFI</b>	12.56 (3.3)	12.84 (4.87)	0.73
<b>EDAD</b>	65.18 (13.67)	60.27 (17.45)	0.1
<b>IMC</b>	18.86 (8.06)	26.98 (7.41)	0.65
<b>TAS</b>	123.8 (22.91)	125.3 (31.66)	0.80
<b>TAD</b>	77.67 (14.91)	78 (17)	0.28
<b>TAM</b>	93.04 (15)	93.77 (14.5)	0.62
<b>FC</b>	78.83 (16.83)	75 (20)	0.61
<b>HTA</b>	33 (51%)	24 (35%)	0.08
<b>ERC</b>	46 (70%)	32 (46%)	0.007
<b>DLP</b>	26 (70%)	32 (46%)	0.56
<b>Hiperuricemia</b>	59 (91%)	59 (85)	0.61

*CFD:* VOP carotídeo femoral derecha, *CFI:* VOP Carotídeo femoral izquierda, *IMC:* Índice de masa corporal, *TAS:* presión arterial sistólica, *TAD:* presión arterial diastólica, *TAM:* presión arterial media, *FC:* frecuencia cardíaca, *HTA:* hipertensión arterial, *ERC:* enfermedad renal crónica, *DLP:* dislipemia

## Desarrollo de modelo de aprendizaje automático

A continuación, describimos el proceso de implementación del modelo de AA, que se llevó a cabo utilizando Python para analizar la relación entre las variables clínicas de relevancia encontradas hasta el momento y la VOP.

### 1. Correlaciones Iniciales

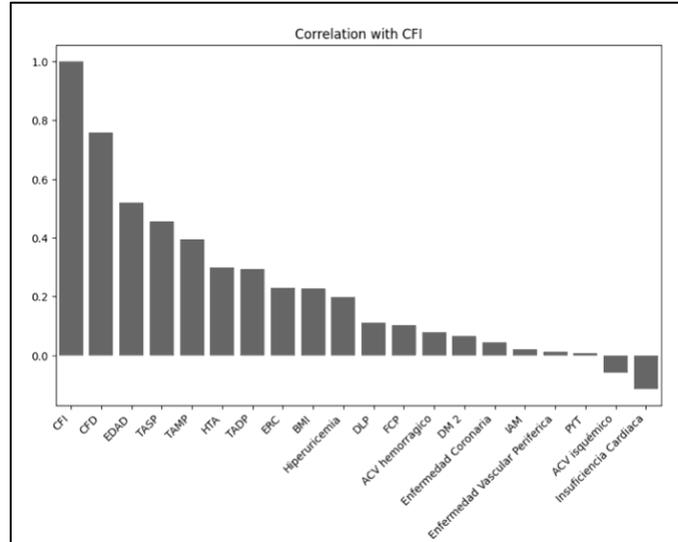
Como primer paso, se calcularon las correlaciones entre 18 variables clínicas y demográficas asociadas a la VOP, tanto CFD como CFI, basándonos en la literatura científica y en el análisis exploratorio de nuestra base de datos. Las variables incluyeron: edad, IMC, TAS, TAM, TAD, FC, HTA, ERC, enfermedad coronaria (EC), insuficiencia cardíaca (IC), accidente cerebrovascular isquémico (ACVi), accidente cerebrovascular hemorrágico (ACVh), enfermedad vascular periférica (EVP), diabetes mellitus tipo 2 (DM2), DLP, hiperuricemia y PYT, este último como una medida acumulativa de tabaquismo.

Las principales correlaciones encontradas fueron:

- Edad presentó una correlación de 0.459 con CFD y 0.520 con CFI.
- TAS mostró una correlación de 0.467 con CFD y 0.456 con CFI.
- TAM tuvo una correlación de 0.438 con CFD y 0.394 con CFI.

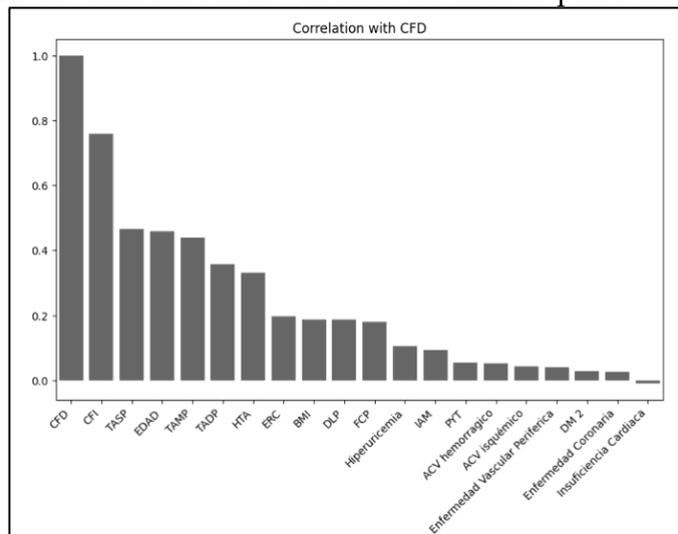
- TAD presentó una correlación de 0.358 con CFD y 0.293 con CFI.
- HTA tuvo una correlación de 0.331 con CFD y 0.300 con CFI.
- PYT, que representa la carga tabáquica acumulada, mostró una correlación baja con la VOP: 0.054 con CFD y 0.008 con CFI, pero se mantuvo en el análisis debido a su relevancia para el presente trabajo. **Gráfico 1 y 2.**

**Gráfico 1:** Correlación de variables con la velocidad de onda de pulso carotídeo femoral izquierda



*CFI:* VOP Carotídeo femoral izquierda, *CFD:* VOP carotídeo femoral derecha, *TASP:* presión arterial sistólica, *TAMP:* presión arterial media, *HTA:* hipertensión arterial, *TADP:* presión arterial diastólica, *ERC:* enfermedad renal crónica, *BMI:* Índice de masa corporal, *DLP:* dislipemia, *FCP:* frecuencia cardíaca, *DM2:* diabetes mellitus tipo 2, *IAM:* infarto agudo de miocardio, *PYT:* pack years totales, *EC:* enfermedad coronaria, *IC:* insuficiencia cardíaca

**Gráfico 2:** Correlación de variables con la velocidad de onda de pulso carotídeo femoral derecha



*CFI:* VOP Carotídeo femoral izquierda, *CFD:* VOP carotídeo femoral derecha, *TASP:* presión arterial sistólica, *TAMP:* presión arterial media, *HTA:* hipertensión arterial, *TADP:* presión arterial diastólica, *ERC:* enfermedad renal crónica, *BMI:* Índice de masa corporal, *DLP:* dislipemia, *FCP:* frecuencia cardíaca, *DM2:* diabetes mellitus tipo 2, *IAM:* infarto agudo de miocardio, *PYT:* pack years totales, *EC:* enfermedad coronaria, *IC:* insuficiencia cardíaca

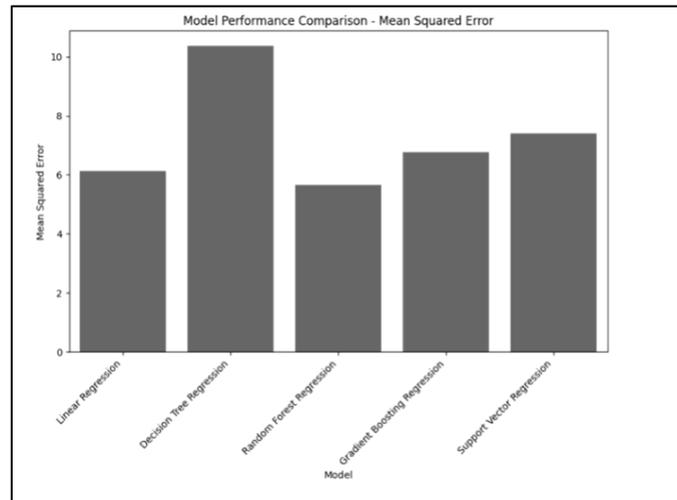
## 2) Resultados de los Modelos de AA

Para el análisis de la VOP CFD, el modelo con mejor rendimiento fue el RFR

• Modelo de predicción RFR: este modelo presentó un MSE de 5.66 y un R2 de 0,32, lo que indica que el modelo explica el 32.5% de la varianza de los valores de CFD. Aunque este valor no es muy alto es el mejor entre todos los modelos probados para este conjunto de datos. El MSE relativamente bajo sugiere que las predicciones son más precisas en comparación con otros modelos evaluados. **Gráfico 3.**

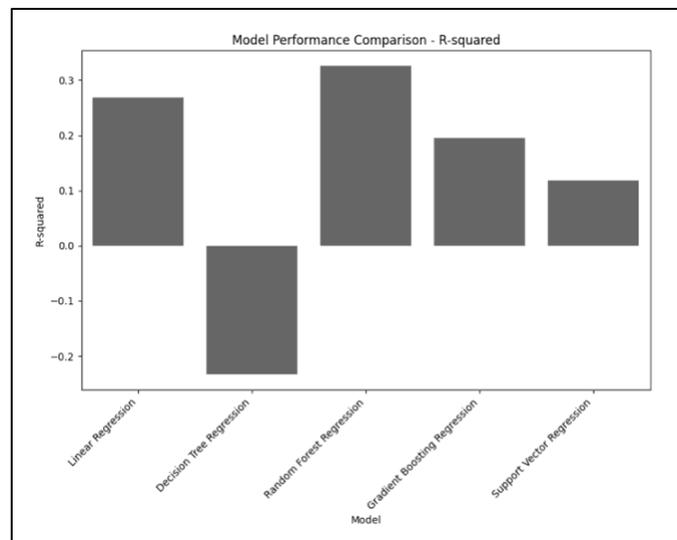
Para la VOP CFI, el modelo que mejor rendimiento tuvo fue la Regresión lineal múltiple (RLM).

**Gráfico 3:** Error Cuadrático Medio (MSE) de los 5 modelos de regresión probados para predecir la velocidad de onda de pulso carotídeo femoral derecha



• Mejor modelo RLM, presentó un MSE de 3.46 y una R2 de 0.51, lo que indica que explica aproximadamente el 51.4% de la varianza en los valores de CFI. Este resultado es moderado y sugiere un ajuste razonablemente bueno. Además, el MSE bajo muestra una precisión de predicción aceptable. **Gráfico 4.**

**Gráfico 4:** R2 de los 5 modelos de regresión probados para predecir la velocidad de onda de pulso carotídeo femoral derecha

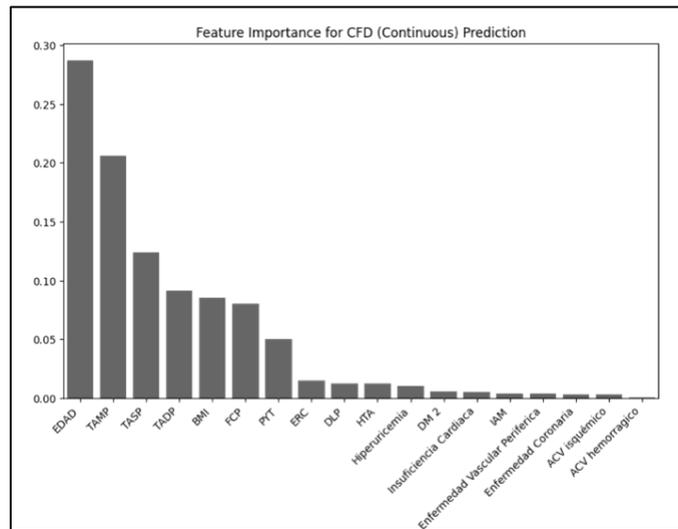


### 3. Importancia de las Variables (Feature Importance)

Posteriormente, se implementó un modelo de RFR para evaluar la importancia de cada variable en la predicción de la VOP. Los resultados mostraron que las variables con mayor influencia en el modelo fueron:

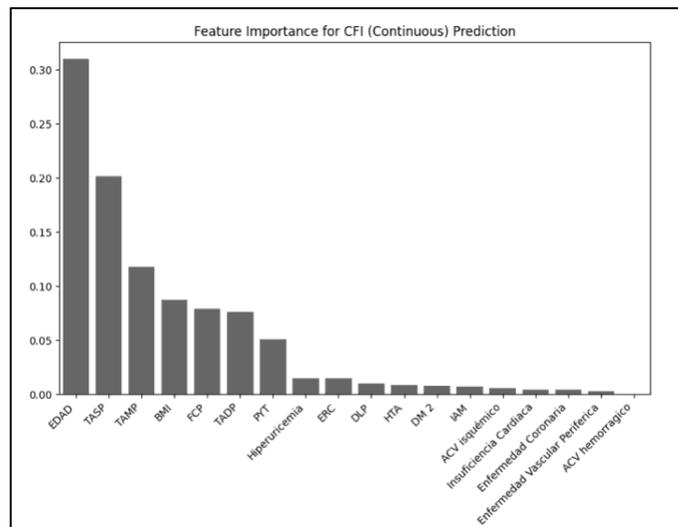
- Edad: fue la variable con mayor importancia, contribuyendo con un 28.7% en la predicción de CFD.
- TAM: con un 20.6% de importancia.
- TAS: con un 12.4% de importancia.
- TAD: con un 9.1% de importancia.
- IMC: que aportó un 8.5%.
- FC: contribuyó con un 8.0%.
- PYT: tuvo una importancia del 5.0%, lo que indica una relación no lineal moderada entre la carga tabáquica acumulada y la rigidez arterial. **Gráfico 5 y 6.**

**Gráfico 5:** Importancia de las variables en la predicción de la velocidad de onda de pulso carotídeo femoral derecha mediante el RFR



**TAM:** presión arterial media, **TAS:** presión arterial sistólica, **TAD:** presión arterial diastólica, **BMI:** Índice de masa corporal, **FCP:** frecuencia cardíaca, **PYT:** pack years totales, **ERC:** enfermedad renal crónica, **DLP:** dislipemia, **HTA:** hipertensión arterial, **DM2:** diabetes mellitus tipo 2, **IC:** insuficiencia cardíaca, **IAM:** infarto agudo de miocardio, **EC:** enfermedad coronaria

**Gráfico 6:** Importancia de las variables en la predicción de la velocidad de onda de pulso carotídeo femoral derecha mediante el RFR



**TASP:** presión arterial sistólica, **TAMP:** presión arterial media, **BMI:** Índice de masa corporal **FCP:** frecuencia cardíaca, **TADP:** presión arterial diastólica, **PYT:** pack years totales, **ERC:** enfermedad renal crónica, **DLP:** dislipemia, **HTA:** hipertensión arterial, **DM2:** diabetes mellitus tipo 2, **IAM:** infarto agudo de miocardio, **IC:** insuficiencia cardíaca, **EC:** enfermedad coronaria

## DISCUSIÓN

El consumo de tabaco genera cambios en la pared vascular a través de diversos mecanismos, como se ha documentado en la literatura <sup>(7)</sup>. Estos incluyen:

- Estrés oxidativo: la generación de radicales libres produce daño directo a las células de la pared arterial.
- Inflamación crónica: los procesos inflamatorios perpetuados incrementan la rigidez arterial.
- Aceleración de la aterosclerosis: el tabaquismo favorece la formación de placas que disminuyen la elasticidad vascular.
- Disminución de óxido nítrico: compromete la vasodilatación, reduciendo la flexibilidad arterial.

Estos mecanismos contribuyen al incremento de la rigidez arterial, que se puede medir mediante el aumento de la VOP <sup>(9)</sup>. La relación entre la edad cronológica y la edad vascular ha sido ampliamente discutida. La VOP elevada indica una mayor rigidez arterial, lo cual sugiere que la edad vascular es mayor que la biológica, impactando directamente en el RCV y prediciendo eventos a largo plazo <sup>(10)</sup>.

Los efectos del tabaquismo sobre la rigidez arterial, reflejados en un aumento de la VOP, resultarían en una edad vascular elevada, incrementando el riesgo de eventos cardiovasculares y mortalidad <sup>(11)</sup>. Se ha demostrado que la cesación tabáquica puede llevar a una regresión de los valores de VOP, reduciendo el riesgo cardiovascular <sup>(12)</sup>.

En cuanto a la relación entre edad vascular y cronológica, Heffernan et al. demostraron que la VOP es un parámetro útil para predecir mortalidad y la consideraron el estándar de oro para estimar la edad arterial, especialmente en grandes cohortes <sup>(14)</sup>.

Los hallazgos de nuestro estudio concuerdan con la literatura. Las variables más asociadas con el aumento de la VOP en nuestra base de datos fueron edad, HTA y ERC. Estas asociaciones son consistentes tanto en los análisis convencionales como en las técnicas de AA.

No obstante, no encontramos una asociación significativa entre DM2 y la VOP mediante métodos convencionales ni aprendizaje automático, lo cual difiere de algunos reportes en la literatura. Esto podría deberse a las características de nuestra población o al número limitado de pacientes diabéticos en la muestra.

Las variables hemodinámicas como TAS, TAD y TAM mostraron una correlación significativa con la VOP, en concordancia con estudios previos.

Inicialmente, no encontramos diferencias significativas en la VOP entre fumadores y no fumadores, tanto en el análisis de medias como de medianas. Sin embargo, al ajustar el análisis eliminando pacientes con HTA y ERC, la diferencia se volvió significativa. Esto sugiere que el tabaquismo impacta directamente la rigidez arterial cuando se aísla de otras comorbilidades.

El uso de AA permitió comprender mejor las relaciones entre variables clínicas y VOP, revelando patrones no lineales que los análisis estadísticos convencionales podrían haber pasado por alto.

En este estudio, se probaron múltiples modelos para predecir la VOP CFD y CFI. Entre ellos, el RFR fue el mejor para CFD, con un MSE de 5.66 y un  $R^2$  de 0.32, explicando un 32% de la variabilidad. Para CFI, el mejor desempeño fue el modelo de RLM, con un MSE de 3.46 y un  $R^2$  de 0.51.

Los modelos lograron predecir la rigidez arterial con precisión moderada. Sin embargo, métricas como  $R^2$  y MSE indican margen de mejora. Una limitación es la falta de más datos, lo que permitiría probar modelos más complejos.

El AA identificó que, aunque HTA y ERC aumentan la rigidez arterial, la edad y el tabaquismo acumulado fueron más influyentes. Las técnicas de AA pueden capturar interacciones no lineales que los métodos tradicionales no detectan.

En el análisis convencional, la VOP fue mayor en pacientes con HTA y ERC. No obstante, en el modelo de AA, su importancia relativa disminuyó cuando se consideró el tabaquismo. Esto puede explicarse por su papel en potenciar otros factores de riesgo a través de inflamación y estrés oxidativo.

Una limitación del estudio es su naturaleza transversal, lo que impide establecer causalidad. Aunque se encontraron asociaciones significativas entre VOP y tabaquismo tras ajustes, no podemos afirmar la dirección del impacto sin un seguimiento longitudinal. Además, el estudio no fue diseñado específicamente para evaluar el tabaquismo, sino para generar bases de datos amplias en poblaciones con múltiples comorbilidades.

Futuras investigaciones con diseños prospectivos permitirán evaluar mejor estas relaciones y mejorar la robustez de los modelos predictivos.

## CONCLUSIÓN

El uso de IA, como su herramienta de AA, está transformando la interpretación de grandes bases de datos clínicas, permitiendo una medicina más precisa y personalizada. En Argentina, la incorporación de estas tecnologías es clave para avanzar hacia un sistema de salud informatizado, donde la generación y análisis de Big data mejore la atención médica y la toma de decisiones clínicas. Este trabajo demuestra la importancia de contar con bases de datos robustas y la integración de herramientas de IA para obtener resultados más precisos y útiles en la práctica clínica.

Por otro lado, se demostró que los FRCV tradicionales como la Edad, HTA, ERC y el TBQ generan cambios en la pared vascular que puede ser detectado precozmente con marcadores no tradicionales, como es la VOP, de fácil realización y no invasiva.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) Tsai T, Tarazi RC. Cigarette smoking and vascular stiffness. *Hypertension*. 2006;47(6):1080-2.
- 2) Ben-Shlomo Y, Spears M, Boustred C, May M, Anderson SG, Benjamin EJ, et al. Aortic pulse wave velocity improves cardiovascular event prediction: an individual participant meta-analysis of prospective observational data from 17,635 subjects. *J Am Coll Cardiol*. 2014;63(7):636-46.
- 3) Galli C, Paniagua M, Camus JM, Ayala M, Cabrera Fischer EI. Estudio no invasivo de las propiedades mecánicas de las arterias: énfasis en la velocidad de la onda del pulso, distensibilidad y compliance arterial. *Rev Cardiol Paraguaya*. 2005;3(3):227-32.
- 4) Wilkinson IB, MacCallum H, Flint L, Cockcroft JR, Newby DE, Webb DJ. The influence of heart rate on augmentation index and central arterial pressure in humans. *J Physiol*. 2002;525(1):263-70.
- 5) Laurent S, Cockcroft J, Van Bortel L, Boutouyrie P, Giannattasio C, Hayoz D, et al. Expert consensus document on arterial stiffness: methodological issues and clinical applications. *Eur Heart J*. 2006;27(21):2588-605.
- 6) Graf S, Pessana F, Craiem D, Galli C, Armentano R. Velocidad de la onda del pulso medida con un prototipo experimental: bases para un estudio longitudinal. *Proyecciones*. 2007; 5(2): 53-59.
- 7) Gu Y, Li Z, Han X. Smoking, alcohol consumption, and risk of arterial stiffness: a two-sample Mendelian randomization study. *Rev Cardiovasc Med*. 2024;25(7):255. doi: 10.31083/j.rcm2507255.
- 8) Hansen TW, Li Y, Boggia J, Thijs L, Richart T, Staessen JA. Prognostic value of aortic pulse wave velocity as index of arterial stiffness in the general population. *Circulation*. 2006;113(5):664-70.
- 9) Díaz A, Galli C, Tringler M, Ramírez A, Cabrera Fischer EI. Reference values of pulse wave velocity in healthy people from urban and rural Argentinean population. *Int J Hypertens*. 2014; 2014:653239. doi: 10.1155/2014/653239.
- 10) Galli CN, Cymberknop L, Armentano R. Caracterización de la rigidez arterial en pacientes con enfermedad renal crónica en estadios pre-diálisis. *Rev Nefrol Arg*. 2023;21(3): 1-10.

- 11) Vallée A. Association between tobacco smoking and alcohol consumption with arterial stiffness. *J Clin Hypertens*. 2023;25:757-67.
- 12) Higashi Y. Smoking cessation and vascular endothelial function. *Hypertens Res*. 2023;46:2670-8. doi: 10.1038/s41440-023-01455-z.
- 13) Hahad O, Schmitt V, Arnold N. Chronic cigarette smoking is associated with increased arterial stiffness in men and women: evidence from a large population-based cohort. *Clin Res Cardiol*. 2023;112:270-84. doi: 10.1007/s00392-022-02092-1.
- 14) Heffernan K, Wilmoth J, London A. Association between tobacco smoking and alcohol consumption with arterial stiffness. *Innov Aging*. 2022;6(7):1-12. doi: 10.1093/geroni/igac056