

CANDIDATURA: Universidad

TÍTULO: Herramienta predictiva de disfunción de catéteres venosos centrales tunelizados en hemodiálisis.

RESUMEN:

La disfunción de los catéteres venosos centrales tunelizados (CVCT) en hemodiálisis representa una complicación frecuente, con impacto directo en la eficacia del tratamiento y la seguridad del paciente. Este estudio desarrolla y valida una herramienta predictiva basada en datos clínicos y técnicos rutinarios, destinada a ser utilizada por el personal de enfermería en cada sesión de hemodiálisis. A partir del análisis de 60.230 sesiones correspondientes a 743 pacientes, se construyeron cinco modelos predictivos mediante regresión logística, seleccionándose finalmente el modelo bootstrapping por su robustez, simplicidad y capacidad discriminativa (AUC 0,843). La herramienta identifica el riesgo de disfunción en la siguiente sesión con una sensibilidad del 81,6% y especificidad del 70,9%, permitiendo implementar medidas preventivas personalizadas. Su integración en la práctica clínica habitual facilita un abordaje proactivo de los accesos vasculares, disminuye la necesidad de tratamientos farmacológicos o recambios urgentes, y mejora la eficiencia asistencial. Esta propuesta supone un avance innovador hacia una hemodiálisis más segura, efectiva y centrada en el paciente.

JUSTIFICACIÓN:

La disfunción de los catéteres venosos centrales tunelizados (CVCT) en hemodiálisis constituye una de las principales causas de ineficacia terapéutica, hospitalizaciones evitables y eventos adversos en pacientes con enfermedad renal crónica terminal. Su abordaje tradicional, basado en intervenciones tardías como el uso de trombolíticos o el recambio del acceso, supone una elevada carga asistencial y económica, además de un impacto negativo en la calidad de vida del paciente. La práctica clínica actual carece de herramientas predictivas accesibles y validadas que permitan anticipar este tipo de complicaciones de forma individualizada y aplicable en la rutina asistencial.

Este proyecto responde a dicha necesidad mediante la construcción y validación de un modelo predictivo simple, basado en variables clínicas y técnicas recogidas de forma rutinaria en cada sesión de hemodiálisis. La herramienta resultante está diseñada específicamente para ser utilizada por el personal de enfermería en tiempo real, lo que representa una innovación asistencial alineada con los principios de seguridad del paciente, eficiencia organizativa y humanización del cuidado. La propuesta es especialmente pertinente en el contexto actual, donde la optimización de recursos y la anticipación de eventos adversos son prioridades estratégicas para los servicios de salud.

DESARROLLO:

La presente investigación ha tenido como objetivo principal la creación y validación de una herramienta predictiva capaz de anticipar con precisión la disfunción de catéteres venosos centrales tunelizados (CVCT) en pacientes en hemodiálisis. Para su diseño, se partió de un enfoque metodológico riguroso, estructurado en distintas fases complementarias, y orientado a obtener una solución clínica de aplicación directa por parte del personal de enfermería. Esta herramienta se basa en datos rutinarios de sesión, lo que la hace altamente operativa, sin requerir tecnología adicional ni intervenciones invasivas.

1. Caracterización de la población y recogida de datos

Durante el periodo analizado, se incluyeron un total de 743 pacientes en tratamiento con hemodiálisis en centros gestionados por la Fundación Renal. La muestra fue mayoritariamente femenina (63,7%), con una edad media de 68 años y una elevada prevalencia de comorbilidades: el 49,4% eran diabéticos y el 84,5% presentaban hipertensión arterial. La mayoría de los pacientes seguía un régimen de tres sesiones semanales de hemodiálisis con una duración promedio de 3,7 horas. Este perfil clínico es representativo de la población con enfermedad renal crónica terminal (ERCT) en nuestro entorno, lo que garantiza la validez externa del modelo propuesto.

Se analizaron un total de 60.230 sesiones de hemodiálisis correspondientes a dichos pacientes, utilizando el sistema Nefrosoft®, que permitió recoger de forma sistematizada variables clínicas, técnicas y hemodinámicas de cada sesión. Entre las variables recogidas se incluyeron parámetros como el flujo sanguíneo, presiones arteriales y venosas, técnica de diálisis utilizada, tipo de sellado del catéter, localización anatómica, etiología de la enfermedad renal, así como antecedentes vasculares y tratamientos anticoagulantes o antiagregantes. Esta información sirvió de base para el análisis estadístico posterior y el desarrollo del modelo predictivo.

2. Fase de entrenamiento: análisis univariado y modelo completo

Se realizó en primer lugar un análisis univariado, considerando de manera independiente cada sesión de hemodiálisis, independientemente de su pertenencia a un mismo paciente. Esta estrategia permitió maximizar la potencia estadística del análisis al tratar las sesiones como unidades observacionales autónomas. El objetivo fue detectar variables con una asociación estadísticamente significativa con el evento de interés (disfunción del catéter), para ser incluidas posteriormente en los modelos multivariados.

El análisis reveló que determinadas variables hemodinámicas y técnicas, como la presión arterial media, la presión venosa media, el flujo sanguíneo inicial y a los 60 minutos, así como el volumen total de sangre depurada, se asociaban de forma inversa con la probabilidad de disfunción. En otras palabras, valores más altos de estos parámetros correspondían con menor riesgo de complicación. Por el contrario, presiones venosas elevadas al inicio y a los 60 minutos, así como la inversión de las líneas del catéter, se identificaron como factores de riesgo claros, esta última con un incremento del 43% en la probabilidad del evento.

A partir de estas variables significativas ($p < 0,05$), se construyó un modelo completo de regresión logística multivariada. Este modelo incluyó todas las variables con significación previa en el análisis univariado. Si bien el modelo mostró una buena capacidad discriminativa inicial, la prueba de ajuste de Hosmer-Lemeshow arrojó un valor de $p = 0,0231$, lo que indica una desviación relevante entre los valores observados y esperados. Esta limitación en la calibración motivó la exploración de modelos más parsimoniosos y con mejor ajuste estadístico.

3. Modelos por pasos y selección de predictores clave

En paralelo al modelo completo, se desarrollaron modelos con estrategias de selección hacia adelante y hacia atrás. Ambos modelos coincidieron en destacar el efecto negativo de la inversión de líneas y la localización yugular izquierda, así como el carácter protector de la técnica de hemodiafiltración postdilucional (HDF). Estos modelos ofrecieron una mejora significativa en la parsimonia del modelo sin pérdida de capacidad discriminativa. El ajuste global fue adecuado (Hosmer-Lemeshow: $p = 0,0013$ para el modelo hacia adelante; $p = 0,0094$ para el modelo hacia atrás) y la AUC obtenida fue de 0,833, lo que indica una excelente discriminación.

Además, se empleó la regresión Lasso como herramienta de selección automática de predictores, que permitió reducir colinealidades y mantener la estabilidad del modelo. Aunque los predictores finales coincidieron en gran parte con los modelos por pasos, se logró una reducción eficiente del número de variables sin afectar el rendimiento.

4. Desarrollo y validación del modelo bootstrapping

Dado que el objetivo era ofrecer una herramienta sencilla, estable y clínicamente útil, se optó por desarrollar también un modelo mediante la técnica de bootstrapping. Este método estadístico, basado en la generación de 200 muestras aleatorias con reemplazo, permitió identificar las variables más robustas y consistentes a lo largo de múltiples iteraciones.

El modelo final incluyó nueve variables, entre ellas la presión arterial media, el flujo sanguíneo inicial y a los 60 minutos, el estado de las líneas del catéter, la presión venosa a los 60 minutos, la etiología renal (enfermedad intersticial, sistémica o desconocida), y la localización anatómica del CVCT. Se estableció un punto de corte óptimo de 0,019, con una sensibilidad del 81,6% y una especificidad del 70,9%. El AUC del modelo fue de 0,844, confirmando su excelente capacidad discriminativa.

5. Validación interna de los modelos y selección final

La siguiente etapa consistió en la validación interna de los tres modelos finalistas: pasos hacia adelante, pasos hacia atrás y bootstrapping. Se utilizó un tercio de la muestra inicial, reservada de forma aleatoria y estratificada, para comprobar la capacidad discriminativa real del modelo en una cohorte independiente. Todos los modelos presentaron valores AUC superiores a 0,83, pero el modelo bootstrapping destacó por su mejor rendimiento general, menor complejidad, y mayor estabilidad estadística.

Además, presentó los mejores indicadores de ajuste (AIC y BIC más bajos), así como una excelente calibración según la prueba de Hosmer-Lemeshow ($p = 0,0016$), lo que motivó su selección como modelo definitivo para la herramienta predictiva.

6. Construcción de la herramienta y aplicación práctica

A partir del modelo bootstrapping validado, se procedió a la implementación práctica de la herramienta mediante una aplicación en Excel®, accesible y operativa para el personal de enfermería. La hoja de cálculo incorpora las fórmulas de regresión logística con los coeficientes β de cada predictor, permitiendo calcular automáticamente la probabilidad de disfunción en la siguiente sesión de HD a partir de los datos registrados durante la sesión actual.

El diseño de la herramienta se orientó específicamente a su uso en el entorno asistencial, permitiendo la toma de decisiones preventivas antes de que la disfunción se manifieste clínicamente. Esta funcionalidad refuerza la capacidad del equipo de enfermería para anticiparse a complicaciones, priorizar la vigilancia de determinados accesos y colaborar estrechamente con el equipo médico en la adopción de medidas correctivas precoces.

DISCUSIÓN / CONCLUSIONES

La disfunción de los catéteres venosos centrales tunelizados (CVCT) continúa siendo una de las complicaciones más relevantes en el manejo de pacientes en hemodiálisis, con consecuencias clínicas, económicas y asistenciales de gran impacto. Esta estrategia reactiva conlleva una importante utilización de recursos, un mayor riesgo de eventos adversos y una pérdida de calidad de vida para los pacientes.

En este contexto, el desarrollo de una herramienta predictiva capaz de anticipar la disfunción del CVCT representa un cambio de paradigma hacia una atención preventiva, personalizada y más eficiente. Los resultados de este estudio han permitido validar un modelo estadístico (bootstrapping) con una alta capacidad discriminativa ($AUC = 0,843$), sensibilidad del 81,6% y especificidad del 70,9%. Estas cifras indican que la herramienta no solo tiene una sólida base metodológica, sino también un elevado valor clínico para su implementación.

A partir de datos obtenidos en la práctica clínica diaria —presión venosa, flujo sanguíneo, técnica de diálisis, estado de las líneas del catéter y localización anatómica, entre otros—, es posible calcular en tiempo real la probabilidad de que un paciente presente disfunción en la siguiente sesión. Este enfoque aporta un valor añadido a la práctica enfermera, al ofrecer una solución integrada en su actividad rutinaria, sencilla de aplicar y de alto impacto potencial.

El logro más significativo de este proyecto reside en su capacidad de transformar un problema clínico frecuente, como la disfunción del CVCT, en una oportunidad de intervención proactiva basada en datos. La herramienta predictiva no solo ha demostrado un excelente rendimiento estadístico, sino que ha sido diseñada desde su origen para integrarse en la rutina de trabajo del personal de enfermería, sin interferir en el flujo asistencial habitual.

Además, la validación interna del modelo garantiza que los resultados no son producto del azar ni de sobreajuste, sino que reflejan patrones reales en el comportamiento del acceso vascular. Esta evidencia fortalece su aplicabilidad en otros centros, y allana el camino para futuras validaciones externas y posibles integraciones en sistemas electrónicos de registro clínico.

La propuesta contribuye a avanzar en el modelo de atención basada en la predicción, alineada con las estrategias de calidad, seguridad del paciente y eficiencia en el uso de recursos. Asimismo, refuerza el rol de la enfermería en la gestión activa del acceso vascular, promoviendo la autonomía profesional, la humanización de los cuidados y la toma de decisiones basadas en evidencia.

En cuanto a sus posibles aplicaciones, cabe destacar:

1. Integración en la rutina asistencial de las unidades de hemodiálisis, como parte de las valoraciones diarias del acceso vascular.
2. Formación del personal de enfermería en el uso de herramientas predictivas, fomentando la autonomía profesional y el juicio clínico basado en evidencia.
3. Desarrollo futuro de sistemas automatizados integrados en software de gestión clínica (como Nefrosoft® o SELENE), que calculen automáticamente el riesgo de disfunción en cada sesión.
4. Utilización como criterio de estratificación de riesgo, en combinación con otras variables clínicas, para el seguimiento protocolizado del acceso vascular.

El desarrollo de esta herramienta predictiva supone una innovación relevante en el ámbito de la nefrología y los cuidados de enfermería, orientada a mejorar la seguridad, calidad y eficiencia de la atención. Su capacidad para anticipar eventos clínicos relevantes con precisión y su aplicabilidad directa en el entorno asistencial la convierten en una intervención con un elevado potencial de impacto positivo en la práctica clínica habitual.