



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Clinical Science

AVANCES EN LA MONITORIZACIÓN DE LA NOCICEPCIÓN: VALIDACIÓN DEL ÍNDICE PLETISMOGRÁFICO QUIRÚRGICO (SPI)

KEY WORDS: Surgical Pleth Index (SPI), Nociception, General Anesthesia, Intraoperative Monitoring, qNOX, Opioids, ROC Curve, Intraoperative Pain, Heart Rate Variability, Guided Analgesia.

Dra. Isabel Jara

Dra. Gabriela Terán

Dra. Ana Mena

Dr. Diego Solis

Dra. Cyndi Torres

Dra. Jessica JiménezTorres

ABSTRACT

Resumen: El Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI) es una herramienta de monitorización no invasiva que evalúa la nocicepción durante la anestesia general mediante el análisis de señales fotopletismográficas y la variabilidad de la frecuencia cardíaca. Este estudio observacional, analítico y prospectivo tuvo como objetivo validar la capacidad predictiva del SPI para detectar dolor intraoperatorio y compararlo con signos vitales tradicionales e índices de nocicepción como el qNOX. Se evaluaron 26 pacientes sometidos a cirugía bajo anestesia general (ASA I-II), registrando los valores de SPI durante distintos eventos quirúrgicos con y sin estímulo doloroso. Los resultados demostraron que el SPI presentó una excelente capacidad discriminativa para identificar dolor, con un área bajo la curva (AUC) de 0.99 en el análisis ROC, superando al qNOX (AUC = 0.90), la frecuencia cardíaca (AUC = 0.51) y la presión arterial media (AUC = 0.55). El SPI se incrementó significativamente ante estímulos dolorosos como la laringoscopia, colocación de línea arterial e incisión quirúrgica, mostrando un patrón cíclico que refleja la activación y resolución nociceptiva. Se propuso un punto de corte de SPI = 26 para diferenciar entre la presencia y ausencia de dolor. El SPI mostró una correlación positiva fuerte con el qNOX ($r = 0.90$, $p < 0.001$), pero asociaciones débiles con los signos vitales. Estos hallazgos respaldan al SPI como un monitor confiable, objetivo y continuo para la nocicepción, con potencial para optimizar el uso de opioides intraoperatorios. Se sugiere continuar investigando su integración con inteligencia artificial para mejorar la toma de decisiones perioperatorias. **Palabras Clave:** Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI), nocicepción, anestesia general, monitorización intraoperatoria, qNOX, opioides, curva ROC, dolor intraoperatorio, variabilidad de la frecuencia cardíaca, analgesia guiada, signos vitales, fotopletismografía, índice biespectral (BIS), estímulo nociceptivo, manejo del dolor. **Summary:** The Surgical Pleth Index (SPI) is a non-invasive monitoring tool that evaluates nociception during general anesthesia by analyzing photoplethysmographic signals and heart rate variability. This prospective analytical observational study aimed to validate SPI's predictive capacity in detecting intraoperative pain and compare its performance against traditional vital signs and the qNOX index. A total of 26 patients undergoing surgery under general anesthesia (ASA I-II) were evaluated. SPI values were recorded during various surgical events with and without nociceptive stimuli. Results demonstrated that SPI exhibited an excellent discriminatory ability to detect pain, with an area under the curve (AUC) of 0.99 on ROC analysis, outperforming qNOX (AUC = 0.90), heart rate (AUC = 0.51), and mean arterial pressure (AUC = 0.55). SPI values increased significantly during painful stimuli such as laryngoscopy, arterial line placement, and surgical incision, showing a consistent cyclic pattern that reflected nociceptive activation and resolution. A cutoff value of SPI = 26 was proposed as a threshold to distinguish between the presence and absence of pain. SPI also showed a strong positive correlation with qNOX ($r = 0.90$, $p < 0.001$), but weak associations with traditional vital signs. These findings support SPI as a reliable, objective, and continuous nociception monitor with potential to optimize opioid administration and improve intraoperative pain management. However, limitations include interindividual variability and influences from other clinical factors. Future research should explore SPI's integration with artificial intelligence for enhanced perioperative decision-making.

C) INTRODUCCIÓN

La anestesia general constituye un pilar fundamental de la práctica quirúrgica moderna y se compone de tres elementos cruciales: hipnosis, analgesia e inmovilidad(1)(2). En la actualidad no se limita únicamente a estos tres pilares, pues también busca preservar la perfusión tisular micro-circulatoria, siempre que se mantenga la hemodinámica macrocirculatoria, todo bajo terapia dirigida por objetivos.(3)(4). El equilibrio entre estos componentes es esencial para garantizar la seguridad y el bienestar del paciente durante la cirugía(2). Tradicionalmente, la evaluación de la analgesia se ha basado en la observación de signos vitales como la frecuencia cardíaca, la presión arterial y la sudoración(5)(6). Sin embargo, estos indicadores pueden ser inespecíficos y no siempre reflejan con precisión el nivel de nocicepción, es decir, la respuesta del sistema nervioso a estímulos potencialmente dañinos(5)(6).

El inadecuado manejo perioperatoria del dolor contribuye al estrés quirúrgico, lo cual podría influir en el desarrollo de dolor crónico en ciertos pacientes(6). Un control deficiente de la nocicepción también se asocia con una mayor morbilidad debido a complicaciones como inestabilidad hemodinámica, lo que se traduce en prolongación de la hospitalización y mayor consumo de opioides que se asocian a complicaciones como la depresión respiratoria e hiperalgesia (6). En entornos donde la monitorización avanzada de la nocicepción, no se encuentran disponibles, el Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI) debería ser considerado como una alternativa para intentar guiar la administración de analgésicos(7)(6).

En este contexto, la monitorización objetiva de la nocicepción se ha convertido en un área de creciente interés y desarrollo. La búsqueda de herramientas más precisas para evaluar la

analgesia ha llevado al desarrollo de diversos monitores, entre ellos, el Índice Pletismográfico Quirúrgico. El SPI es un índice derivado de la fotopletismografía, una técnica no invasiva que analiza las variaciones en el volumen sanguíneo en los vasos periféricos(8). Este índice se ha propuesto como una alternativa prometedora para monitorizar la respuesta del paciente a estímulos nociceptivos durante la anestesia general(2).

Fundamentos Fisiológicos del SPI

El SPI se basa en el análisis de la onda de pulso pletismográfica, que refleja la actividad del sistema nervioso autónomo (SNA)(2). El SNA, compuesto por las ramas simpática y parasimpática, juega un papel clave en la modulación de la respuesta al dolor(9). Durante la estimulación nociceptiva, se espera que el sistema nervioso simpático se active, reflejándose en cambios en frecuencia cardíaca y amplitud de la onda de pulso(8).

El SPI utiliza la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) para evaluar el equilibrio entre el sistema nervioso simpático y parasimpático. La VFC es un indicador de la capacidad del sistema nervioso autónomo para adaptarse a diferentes estímulos(10). La amplitud de la onda de pulso pletismográfica también se analiza por el SPI. Cambios en esta amplitud pueden indicar la presencia de estímulos nociceptivos(8)(1).

El SPI integra estos parámetros en un único valor numérico, que se presenta en una escala de 0 a 100 (1). Un rango entre 20 y 50 se considera ideal, lo que sugiere un equilibrio adecuado del sistema nervioso autónomo y una analgesia óptima(5)(11). Valores por debajo de 20 pueden indicar una sobredosis de analgésicos, mientras que valores superiores a 50 pueden señalar una analgesia insuficiente (5)(2)(12).

Desarrollo y Evolución del SPI

El SPI, originalmente conocido como Índice de Estrés Quirúrgico (SSI), fue desarrollado en 2007 con el objetivo de mejorar la precisión en la anestesia general con propofol y remifentanilo. En 2012, se renombró como Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI)(6). Este cambio de nombre refleja una mejor comprensión de los mecanismos fisiológicos subyacentes al índice y su aplicación en la monitorización de la nocicepción.

Inicialmente, se propuso que el SPI reflejara el nivel de estrés quirúrgico(13). Sin embargo, la investigación posterior demostró que el SPI también puede ser útil para guiar la administración de analgésicos y optimizar el equilibrio entre la nocicepción y la antinocicepción durante la anestesia general(13)(11).

Aplicaciones Clínicas del SPI en la Anestesia General

El SPI se ha estudiado en diversos contextos clínicos, demostrando su potencial como herramienta para mejorar la calidad de la analgesia intraoperatoria, permitiendo al anestesiólogo ajustar las dosis de manera oportuna(14)(5). Se puede utilizar para guiar la administración de opioides, como el remifentanilo, sufentanilo y fentanilo, durante la cirugía(2)(14). Al mantener el SPI en el rango objetivo (20-50), se busca optimizar el uso de analgésicos, reduciendo la necesidad de dosis excesivas y mejorando la estabilidad hemodinámica (5).

Además, puede reflejar la respuesta del paciente a diversos estímulos nocivos, como la intubación, la incisión quirúrgica y la manipulación de tejidos(15)(14)(11). La analgesia guiada por SPI podría reducir el tiempo de extubación y el tiempo para abrir los ojos después de la cirugía(11). Algunos estudios sugieren que la monitorización del SPI puede llevar a una reducción en el consumo de opioides durante la cirugía, tiempos de recuperación más cortos, niveles más bajos de cortisol y ACTH(5)(11). Este índice se está investigando como

una herramienta para monitorizar la nocicepción durante la anestesia libre de opioides, que utiliza técnicas de analgesia multimodal y anestesia regional, guiando la administración de analgésicos no opioides(8).

Ventajas

El SPI ofrece varias ventajas en comparación con los métodos tradicionales de monitorización de la analgesia.(5)(14). Proporciona una medida objetiva de la respuesta del paciente al dolor, lo que reduce la subjetividad asociada con la observación clínica(2)(12). Al ser un monitor continuo, permite al anestesiólogo detectar cambios en la respuesta nociceptiva del paciente en tiempo real (14). Los valores para su cálculo se obtienen mediante un sensor no invasivo, lo que reduce el riesgo de complicaciones asociadas a procedimientos invasivos y disminuye el uso de dispositivos adicionales(11) (14).

Es un índice fácil de entender e interpretar, lo que simplifica su uso en la práctica clínica diaria(11). Por último, ayuda a personalizar la administración de analgésicos, adaptando la dosis a las necesidades individuales de cada paciente, disminuyendo la necesidad de dosis excesivas y mejorando la estabilidad hemodinámica (16)(17).

Limitaciones

A pesar de sus ventajas, el SPI también tiene algunas limitaciones importantes que deben ser consideradas ya que puede ser afectado por factores como la hipotermia, arritmias, fibrilación auricular, el uso de marcapasos, fármacos inotrópicos, vasoactivos, atropina, betabloqueadores y situaciones de hipovolemia(2). La respuesta del SPI a estímulos nocivos puede variar entre individuos y que la edad es un factor importante a tener en cuenta durante la monitorización (2)(18). Algunos pacientes pueden ser más sensibles al dolor que otros, lo que puede llevar a diferencias en las lecturas del SPI(18).

El tipo de anestésico utilizado puede influir en la eficacia del SPI(14). Por ejemplo, se ha observado que la analgesia guiada por SPI puede ser menos efectiva en pacientes que reciben anestesia inhalatoria en comparación con la anestesia total intravenosa (TIVA) (19). No se ha encontrado una correlación significativa entre el SPI y otros índices de monitoreo de la nocicepción, como el Índice de Nocicepción-Analgesia (ANI). Esta falta de correlación sugiere que el SPI y el ANI pueden medir diferentes aspectos de la respuesta al dolor(20). En algunos casos, el SPI puede no reflejar con precisión la respuesta clínica del paciente al dolor, como en pacientes despiertos(18).

De esta manera, el SPI ha surgido como una alternativa prometedora en la monitorización de la nocicepción durante la anestesia general. Su capacidad para proporcionar una medida objetiva y continua de la respuesta al dolor, junto con su sencillez y no invasividad, lo convierten en una herramienta atractiva para la práctica clínica diaria. Sin embargo, es importante reconocer sus limitaciones y utilizarlo con precaución en combinación con otros parámetros de monitorización.

La investigación futura debería centrarse en la optimización del uso del SPI en diferentes poblaciones de pacientes y contextos quirúrgicos, así como en la integración del SPI con otros monitores de la anestesia, que podrían llevar a una nueva era la práctica de la anestesia, que podría tener como una gran herramienta a la inteligencia artificial con el objetivo de mejorar la seguridad perioperatoria.

D) Material Y Métodos

Se realizó un estudio observacional, analítico y prospectivo con el objetivo de evaluar la capacidad del Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI) para predecir la presencia de dolor en pacientes sometidos a anestesia general.

Además, se analizó su relación con otros parámetros de nocicepción (Qnox), signos vitales (frecuencia cardíaca y presión arterial) y su posible utilidad para la optimización del uso de opioides intraoperatorios.

Se validó este índice con un muestreo exhaustivo de 26 pacientes que cumplieron los criterios de inclusión pacientes programados para procedimientos quirúrgicos bajo anestesia general ASA I y ASA II, Se analizaron diferentes fases intraoperatorias, desde el periodo basal hasta la presencia de estímulos dolorosos específicos. Las Variables analizadas; Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI), Índices de nocicepción: qNOX, Frecuencia cardíaca (FC), Presión arterial media (PA), Dosis de opioides (ug/kg/min), Presencia o ausencia de estímulos dolorosos y se midieron sus valores en distintos momentos del procedimiento quirúrgico.

Se compararon los valores de SPI en presencia y ausencia de estímulos dolorosos utilizando la prueba U de Mann-Whitney, además se analizó la evaluación de SPI con qNOX mediante el coeficiente de Pearson. Se generaron gráficos comparativos para ilustrar la relación entre SPI y los distintos parámetros analizados y se representaron los valores de SPI en eventos con y sin estímulo doloroso para observar su comportamiento.

e) RESULTADOS

1. Capacidad Predictiva del SPI Para Identificar Dolor

Para evaluar la capacidad del Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI) como predictor de nocicepción, se generó una curva ROC comparando su rendimiento con otros parámetros fisiológicos como Frecuencia Cardíaca (FC), Presión Arterial Media (PAM) y Qnox. Se encontró que el SPI obtuvo un área bajo la curva (AUC) de 0.99, lo que indica una excelente capacidad discriminativa para detectar dolor, mientras que Qnox mostró un AUC de 0.90. En cambio, FC (AUC = 0,51) y PAM (AUC = 0,55) no mostraron una capacidad predictiva significativa. El AUC es una medida que evalúa el rendimiento de un modelo de clasificación. Representa la probabilidad de que el modelo distinga correctamente entre una clase positiva y una negativa. Un valor de AUC cercano a 1 indica una excelente capacidad de discriminación, mientras que un valor de 0,5 sugiere un rendimiento similar al azar.

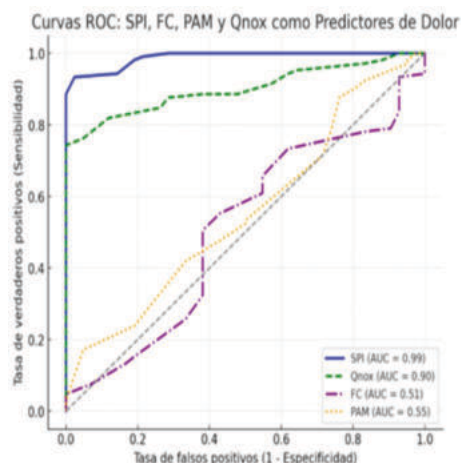


Figura 1: Curva ROC del SPI y Otros Parámetros Como Predictores de Dolor.

2. Distribución del SPI Según el Tipo de Estímulo Doloroso

El análisis de la distribución del SPI en distintos momentos quirúrgicos muestra que el SPI aumenta de manera significativa ante estímulos dolorosos. Se observará un incremento notable durante la laringoscopia, colocación de línea arterial e incisión quirúrgica, en comparación con los momentos sin estímulo doloroso.

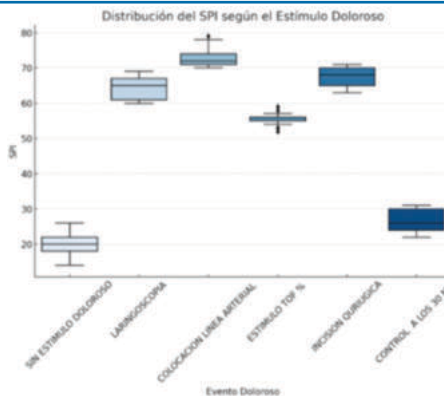


Figura 2: Distribución del SPI Según Evento Doloroso.

3. Comportamiento del SPI Ante Diferentes Eventos

El análisis de tendencia del SPI en función del evento doloroso confirma que los valores de SPI se elevan tras la exposición a un estímulo doloroso y disminuyen posteriormente. Se observa un patrón cíclico de incremento y descenso, con una clara separación entre momentos de nocicepción y reposo. Se destaca que el punto de corte de SPI = 26 podría ser útil para discriminar entre dolor y ausencia del mismo.

La prueba de Mann - Whitney demostró diferencias estadísticamente significativas entre los valores de SPI en presencia y ausencia del estímulo. ($p < 0,01$).

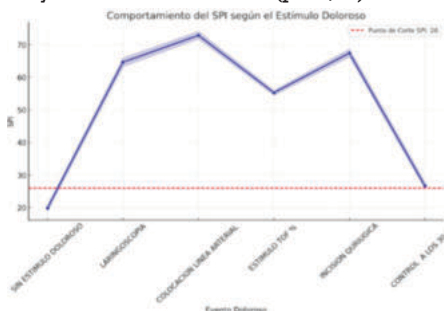


Figura 3: Comportamiento del SPI Según el Estímulo Doloroso.

La gráfica muestra el comportamiento del SPI en función de diferentes estímulos dolorosos. El patrón cíclico de ascenso y descenso sugiere una relación directa entre el evento doloroso y el valor de SPI, afirmando que el SPI responde de manera clara a estímulos nociceptivos. La línea roja indica un punto de corte SPI = 26, que podría servir para diferenciar presencia y ausencia de dolor.

4. Comparación del SPI con Otros Parámetros Fisiológicos

Se analizaron en conjunto los valores de SPI, Qnox, FC, PAM y BIS en función del tipo de estímulo doloroso. Se evidencia que SPI y Qnox siguen patrones similares, reflejando la nocicepción con mayor precisión que los signos vitales.

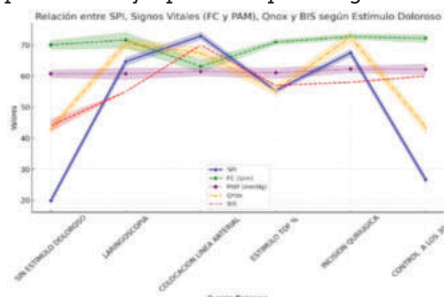


Figura 4: Relación del SPI con Otros Parámetros Fisiológicos.

5. Correlación del SPI con Qnox, Signos Vitales y BIS

Para evaluar la relación entre SPI y otras variables, se calculó el coeficiente de evaluación de Pearson. Se encontró una evaluación muy fuerte entre SPI y Qnox ($r = 0.90$, $p < 0.001$), con un AUC de 0,99 para el SPI (IC 95%: 0,97 – 1.00) y Qnox (IC 95%: 0,84 – 0,96). En contraste, que los signos vitales mostraron correlaciones débiles o no significativas (FC: $r = -0.17$, PAM: $r = 0.02$), la frecuencia cardíaca con un AUC de 0,51 y la presión arterial media, un AUC de 0,55. El BIS mostró una evaluación moderada con el SPI ($r = 0,67$, $p < 0,001$). Estos resultados refuerzan la utilidad del SPI como herramienta más específica para monitorizar la nocicepción.

Figura 5: Diagrama de Calificación del SPI con Otros Parámetros.

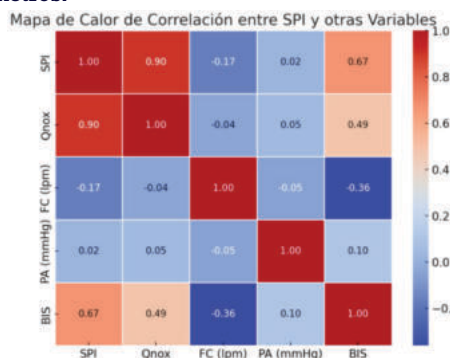


Figura : Mapa de Calor de Correlación Entre SPI y Otras Variables Fisiológicas.

6. Relación del SPI con Qnox, FC, PAM y BIS

Finalmente, la comparación individual de SPI con Qnox, FC, PAM y BIS a través de gráficos de dispersión refuerza los hallazgos anteriores. Se observa una asociación lineal positiva entre SPI y Qnox, mientras que la FC y la PAM muestran relaciones inconsistentes.

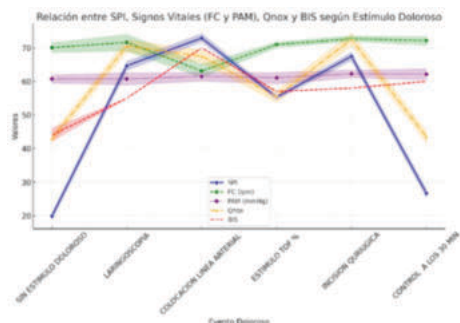


Figura 7: Gráficos de Dispersión Entre SPI y Otras Variables.

8) DISCUSIÓN

En el ámbito de la monitorización intraoperatoria de la nocicepción, la capacidad de los índices para predecir respuestas nociceptivas es fundamental para optimizar la analgesia y mejorar los resultados postoperatorios. En el presente estudio, se evaluó la eficacia del Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI) como predictor de nocicepción, comparándolo con otros parámetros fisiológicos como la Frecuencia Cardíaca (FC), la Presión Arterial Media (PAM) y el índice Qnox, mediante el análisis de curvas ROC. Los resultados mostraron que el SPI obtuvo un área bajo la curva (AUC) de 0.99, indicando una excelente capacidad discriminativa para detectar dolor. Estos resultados son consistentes con estudios previos que han evaluado la eficacia del SPI en la monitorización de la nocicepción. Por ejemplo, Merino et al. en su artículo "Estimación del dolor durante el perioperatorio: Una revisión narrativa de los dispositivos disponible" encontraron que el SPI mostraba una alta sensibilidad y especificidad para detectar respuestas nociceptivas durante la incisión

quirúrgica, con un AUC elevado en la curva ROC, lo que respalda su utilidad clínica en la monitorización intraoperatoria. Además, Gilsanz y Guasch (18), mediante un estudio observacional en pacientes bajo anestesia total intravenosa (TIVA), concluyeron que el SPI, al evaluar el tono simpático mediante la combinación de parámetros como los intervalos normalizados de la frecuencia cardíaca y la amplitud pletismográfica del pulso, proporciona una medida confiable del equilibrio entre el tono simpático y parasimpático durante la cirugía.

Es importante destacar que la FC (AUC = 0,51) y la PAM (AUC = 0,55), aunque son parámetros vitales rutinariamente monitorizados, no mostraron una capacidad predictiva significativa en la detección de nocicepción en el presente estudio. Esto concuerda con la literatura existente, en un estudio de Abad-Gurumeta et al. (18) señala que, durante un estímulo nociceptivo, la respuesta autonómica provoca un pequeño incremento de la presión sanguínea seguido por un aumento de corta duración de la frecuencia cardíaca. Sin embargo, estos cambios pueden no reflejar de manera específica la nocicepción, ya que las variables hemodinámicas pueden verse afectadas por múltiples factores no relacionados con el dolor como por el ejemplo el uso de ciertos fármacos con efectos cardiovasculares (efedrina, fenilefrina y nicardipina), estado de volemia, la edad, posición de paciente, neumoperitoneo, ventilación mecánica y relajación neuromuscular(20)(15).

Por su parte, El índice Qnox mostró un área bajo la curva (AUC) de 0,90 en la detección de dolor, lo que indica una buena capacidad discriminativa. Sin embargo, el Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI) presentó una superioridad notable con un AUC de 0,99. Lo que difiere con un estudio reciente, donde Serrablo (18) evalúa la capacidad del índice Qnox para discriminar entre estímulos nocivos y no nocivos en pacientes bajo anestesia con propofol y bloqueo neuromuscular. Los resultados indicaron que el Qnox tenía una capacidad limitada para distinguir estos estímulos, con un área bajo la curva (AUC) de 0,52 a 0,67, dependiendo del tipo de estímulo. Además, el Qnox no mostró una capacidad adecuada para diferenciar entre distintos niveles de analgesia, lo que sugiere limitaciones en su eficacia como monitor de nocicepción intraoperatoria. Es importante destacar que, aunque el Qnox ha demostrado ser una herramienta útil en la monitorización de la nocicepción, el SPI podría ofrecer ventajas adicionales en términos de precisión y especificidad. La elección entre estos índices debe basarse en las características específicas de cada paciente y en el contexto clínico particular (18).

El Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI) ha sido objeto de múltiples estudios que analizan su comportamiento ante diversos estímulos nociceptivos durante procedimientos quirúrgicos. En el presente trabajo investigativo se evidencia que el SPI aumenta significativamente en respuesta a estímulos dolorosos como la laringoscopia, la colocación de una línea arterial y la incisión quirúrgica, en comparación con períodos sin estímulos dolorosos. Resultados que concuerdan con los encontrados por Struys, Baerdemaeker y Mortier (18) donde analizaron la relación entre el SPI y la analgesia en pacientes bajo anestesia general. Su estudio reveló que el SPI aumentaba de manera considerable durante la laringoscopia y la incisión quirúrgica, reflejando la activación simpática ante estos estímulos. Estos hallazgos sugieren que el SPI puede ser un marcador más específico de la nocicepción en comparación con parámetros tradicionales como la frecuencia cardíaca y la presión arterial media. De igual forma, Sabourdin et al. (18) evalúan la precisión del SPI en niños y adultos sometidos a procedimientos quirúrgicos. Sus resultados indicaron que el SPI respondía de forma más confiable que otros indicadores fisiológicos ante eventos dolorosos, como la intubación y la manipulación quirúrgica. En conjunto, estos estudios respaldan el uso del SPI como un indicador confiable de la nocicepción intraoperatoria. Su

capacidad para detectar incrementos significativos ante estímulos dolorosos lo convierte en una herramienta valiosa para la optimización del manejo del dolor en el entorno quirúrgico (18)

El análisis de la tendencia del Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI) en relación con eventos dolorosos confirma su capacidad para reflejar variaciones en la nocicepción intraoperatoria. Se ha observado un patrón cíclico de incremento y descenso del SPI en respuesta a estímulos nociceptivos, con valores elevados tras la exposición al dolor y una disminución progresiva en ausencia de estímulo. Este comportamiento sugiere que el SPI es un marcador dinámico y sensible, capaz de diferenciar momentos de nocicepción de aquellos en los que el paciente se encuentra en reposo. Se destaca que el punto de corte de SPI = 26 podría ser útil para discriminar entre dolor y ausencia de este. En cuanto al punto de corte del SPI para discriminar entre la presencia y ausencia de dolor, un estudio publicado por Dávila y Meza (18) encontraron que un valor de SPI de 36, medido en los últimos minutos de la cirugía, puede predecir dolor postoperatorio moderado a severo con mayor eficacia que las variables hemodinámicas tradicionales como la frecuencia cardíaca y la presión arterial media. En este sentido Gómez (18) señala que umbrales específicos de SPI pueden ser utilizados para guiar la administración de analgesia en tiempo real, reduciendo tanto la subdosificación como la sobredosificación de fármacos opioides. En la misma línea, Flaatten, Chew y Gisvold (18) encontraron que los valores del SPI pueden variar en función del tipo de anestesia utilizada, con una mayor estabilidad en pacientes bajo anestesia total intravenosa (TIVA).

No obstante, es importante considerar que el SPI no debe utilizarse como único indicador para el manejo del dolor intraoperatorio. Struys, Baerdemaeker y Mortier (18) destacaron que factores como la variabilidad interindividual, el tipo de anestesia y la respuesta autonómica del paciente pueden influir en la interpretación del índice. Por ello, se recomienda su uso en combinación con otros parámetros clínicos y herramientas de monitoreo de la nocicepción.

El análisis de la medición entre el Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI) y otras variables fisiológicas mediante el coeficiente de Pearson ha revelado hallazgos relevantes para la monitorización de la nocicepción intraoperatoria. Se observó una evaluación muy fuerte entre el SPI y el índice Qnox ($r = 0.90$, $p < 0.001$), lo que sugiere que ambos parámetros reflejan de manera similar la respuesta nociceptiva en pacientes bajo anestesia general. La fuerte relación entre el SPI y el Qnox es consistente con estudios previos que han evaluado la precisión de diferentes herramientas para la detección de nocicepción. En este sentido, Navarro (18) demostraron que el Qnox, al igual que el SPI, responde de manera significativa a estímulos dolorosos intraoperatorios, permitiendo una mejor administración de los analgésicos administrados. Asimismo, Domínguez (18) evidenció que ambos índices presentan una sensibilidad superior a los signos vitales tradicionales para la detección del dolor intraoperatorio, lo que refuerza su utilidad clínica.

En contraste, los signos vitales como la frecuencia cardíaca (FC) y la presión arterial media (PAM) mostraron correlaciones débiles o no significativas con el SPI (FC: $r = -0.17$, PAM: $r = 0.02$). Esto sugiere que los cambios en estas variables pueden estar influenciados por múltiples factores además del dolor, como el estado hemodinámico basal del paciente, el efecto de los anestésicos o la variabilidad autonómica individual. Al respecto, Apolonio (18) señala que la frecuencia cardíaca y la presión arterial no son indicadores confiables de nocicepción intraoperatoria, ya que su variabilidad puede deberse a múltiples causas no relacionadas con el dolor.

Por otro lado, el BIS (Índice Biespectral) mostró una evaluación moderada con el SPI ($r = 0,67$, $p < 0,001$). Este resultado es congruente con investigaciones como la de Hans et al. (18), quienes reportaron que el BIS es útil para evaluar la profundidad anestésica, pero su capacidad para reflejar cambios en la nocicepción es limitada en comparación con índices específicos como el SPI o el Qnox. Estos hallazgos refuerzan la utilidad del SPI como una herramienta más sensible y específica para la detección de nocicepción intraoperatoria en comparación con parámetros fisiológicos tradicionales. La fuerte determinación con el Qnox sugiere que ambos índices pueden ser utilizados de manera complementaria en la práctica clínica.

Finalmente, la comparación individual del Índice Pletismográfico Quirúrgico (SPI) con Qnox, frecuencia cardíaca (FC), presión arterial media (PAM) e índice biespectral (BIS) a través de gráficos de dispersión refuerza los resultados previos obtenidos mediante el análisis de tensión. Se observa una clara asociación lineal positiva entre SPI y Qnox, mientras que la relación con FC y PAM es inconsistente, lo que sugiere que estos últimos parámetros no son indicadores confiables de la nocicepción intraoperatoria. La inconsistencia observada en la relación entre SPI y los signos vitales, como FC y PAM, sugiere que estos parámetros pueden estar influenciados por múltiples factores no necesariamente relacionados con la nocicepción. En este sentido, Bollici (18) señala que las variaciones en la frecuencia cardíaca y la presión arterial pueden deberse a estímulos no nociceptivos, como cambios en el volumen sanguíneo, la respuesta autonómica a la anestesia o el estado hemodinámico basal del paciente. Esto respalda la idea de que los signos vitales no deben utilizarse como única referencia para evaluar la nocicepción en el entorno quirúrgico.

Estos resultados destacan la importancia de emplear herramientas específicas como el SPI y el Qnox para la monitorización intraoperatoria de la nocicepción, en lugar de depender únicamente de los signos vitales. Sin embargo, se recomienda seguir investigando para determinar cómo estos índices pueden integrarse de manera óptima en diferentes tipos de procedimientos quirúrgicos y protocolos anestésicos.

La investigación futura sobre la aplicación de inteligencia artificial (IA) en la monitorización de la nocicepción se centra en la mejora de la predicción del dolor, la monitorización continua y personalizada de la respuesta cerebral, el diseño de nuevos fármacos, y el potencial de convertir los monitores en herramientas terapéuticas. Si bien existen desafíos relacionados con la complejidad de los modelos y la falta de evidencia clínica sólida en la actualidad, el potencial de la IA para transformar la anestesia y el manejo del dolor en la práctica cotidiana.

g) Anexos

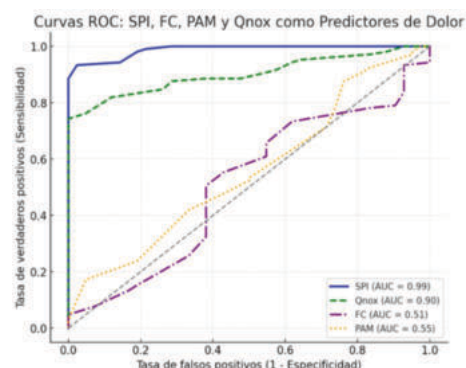


Figura 1: Curva ROC del SPI y Otros Parámetros Como Predictores de Dolor.

La gráfica muestra las curvas ROC de cuatro indicadores (SPI, Qnox, FC y PAM) como predictores de dolor. La sensibilidad se representa en el eje Y, mientras que la especificidad está en el eje X. El SPI tiene el mejor desempeño con un área bajo la curva (AUC) de 0.99, seguido de Qnox (AUC = 0.90), mientras que los parámetros FC (AUC = 0.51) y PAM (AUC = 0.55) muestran menor capacidad predictiva. Esto indica que SPI y Qnox son los predictores más fiables para nocicepción.

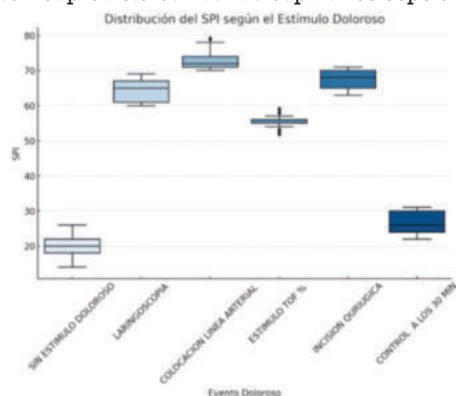


Figura 2: Distribución del SPI Según Evento Doloroso.

La gráfica muestra la distribución del índice SPI en múltiples eventos dolorosos durante un procedimiento. El SPI es más bajo en la ausencia de estímulo doloroso y en el control a los 30 minutos, mientras que alcanza valores más altos en eventos como la laringoscopia, la colocación de la línea arterial, el estímulo TOF y la incisión quirúrgica. Destacan variaciones dentro de cada grupo, lo que sugiere diferencias individuales en la respuesta al dolor.

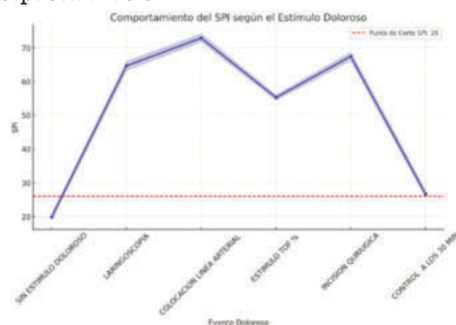


Figura 3: Comportamiento del SPI Según el Estímulo Doloroso.

La gráfica muestra el comportamiento del SPI en función de diferentes estímulos dolorosos. El patrón cíclico de ascenso y descenso sugiere una relación directa entre el evento doloroso y el valor de SPI, afirmando que el SPI responde de manera clara a estímulos nociceptivos. La línea roja indica un punto de corte SPI = 26, que podría servir para diferenciar presencia y ausencia de dolor.

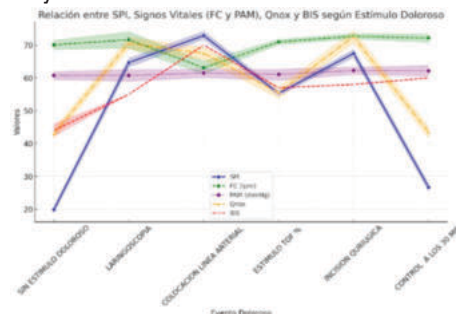


Figura 4: Relación del SPI con Otros Parámetros Fisiológicos.

La figura muestra la relación entre el SPI, signos vitales (FC y

PAM), Qnox y BIS en función de distintos eventos dolorosos. Se observa una asociación positiva entre SPI y Qnox, con incrementos simultáneos en respuesta a estímulos nociceptivos. En contraste, la FC y la PAM presentan variaciones menos consistentes, lo que sugiere una menor sensibilidad a los cambios en la nocicepción.

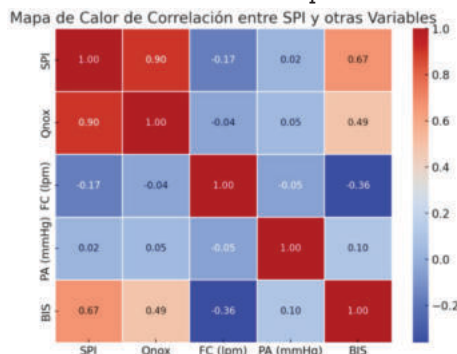


Figura 5: Mapa de Calor de Correlación Entre SPI y Otras Variables Fisiológicas.

La gráfica es un mapa de calor que muestra la correlación de Pearson entre SPI y otras variables fisiológicas. Se observa una fuerte correlación positiva entre SPI y Qnox ($r = 0.90$) y una moderada con BIS ($r = 0.67$), lo que sugiere una relación significativa entre estas medidas. En contraste, las correlaciones con la FC ($r = -0.17$) y la PAM ($r = 0.02$) son débiles o insignificantes, indicando poca asociación con los signos vitales.

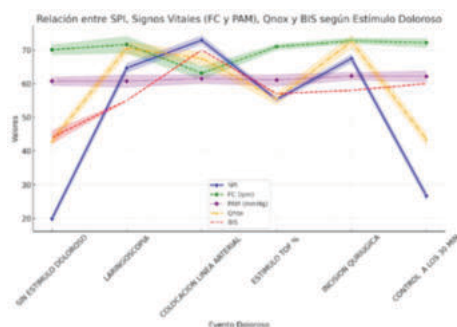


Figura 6: Gráficos de Dispersión Entre SPI y Otras Variables.

La figura muestra la relación entre el SPI, signos vitales (FC y PAM), Qnox y BIS en función de distintos eventos dolorosos. Se observa una asociación positiva entre SPI y Qnox, con incrementos simultáneos en respuesta a estímulos nociceptivos. En contraste, la FC y la PAM presentan variaciones menos consistentes, lo que sugiere una menor sensibilidad a los cambios en la nocicepción.

Aplicaciones Clínicas y Perspectivas Futuras en la Anestesia

El SPI se perfila como una herramienta de gran valor para personalizar la administración de opioides intraoperatorios, mejorar la estabilidad hemodinámica y disminuir el dolor postoperatorio.

Su utilidad puede ser de particular beneficio en entornos de anestesia libre de opioides junto a técnicas de analgesia multimodal.

Para un desarrollo futuro el enfoque debería radicar en la integración del SPI con inteligencia artificial y sistemas de circuito cerrado que ajusten de forma automática la dosis de analgésicos en función de parámetros fisiológicos en tiempo real.

Esta evolución podría marcar un cambio hacia una anestesia verdaderamente personalizada y basada en datos objetivos

de la propia monitorización de los pacientes.

xh) REFERENCES

- Bergman T, Kalliomäki ML, Särkelä M, Harju J. The use of the surgical pleth index to guide anaesthesia in gastroenterological surgery: a randomised controlled study. *Journal of Clinical Monitoring and Computing* 2025 [Internet]. 2025 Jan 20 [cited 2025 Feb 3];1–9. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10877-025-01262-6>
- Ryu K, Song K, Kim J, Kim E, Kim SH. Comparison of the analgesic properties of sevoflurane and desflurane using surgical pleth index at equi-minimum alveolar concentration. *Int J Med Sci*. 2017 Aug 18;14(10):994–1001.
- Flick M, Schreiber TH, Montomoli J, Krause L, de Boer HD, Kouz K, et al. Microcirculatory tissue perfusion during general anaesthesia and noncardiac surgery: An observational study using incident dark field imaging with automated video analysis. *Eur J Anaesthesiol* [Internet]. 2022 Jul 1 [cited 2025 Apr 13];39(7):582–90. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35759291/>
- Jessen MK, Vallengin MF, Holmberg MJ, Bolther M, Hansen FB, Holst JM, et al. Goal-directed haemodynamic therapy during general anaesthesia for noncardiac surgery: a systematic review and meta-analysis. *Br J Anaesth* [Internet]. 2022 Mar 1 [cited 2025 Apr 13];128(3):416–33. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34916049/>
- Won YJ, Lim BG, Lee SH, Park S, Kim H, Lee IO, et al. Comparison of relative oxydodone consumption in surgical pleth index-guided analgesia versus conventional analgesia during sevoflurane anesthesia A randomized controlled trial. *Medicine (United States)*. 2016;95(35).
- Azucena Reyes-Hernández D, Alejandro Márquez-Gutiérrez de Velasco J, Manuel Athié-García J. Comparing analgesic nociception index to surgical plethysmographic index in laparoscopic opioid analgesia. [cited 2025 Feb 3]; Available from: <https://dx.doi.org/10.35366/116166>
- Azucena Reyes-Hernández D, Alejandro Márquez-Gutiérrez de Velasco J, Manuel Athié-García J. Comparing analgesic nociception index to surgical plethysmographic index in laparoscopic opioid analgesia. [cited 2025 Feb 3]; Available from: <https://dx.doi.org/10.35366/116166>
- Won YJ, Lim BG, Kim YS, Lee M, Kim H. Usefulness of surgical pleth index-guided analgesia during general anesthesia: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of International Medical Research* [Internet]. 2018 Nov 1 [cited 2025 Feb 3];46(11):4386–98. Available from: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0300060518796749?url_ver=Z39.88-2003&rft_id=ori%3Arid%3Aacrossref.org&rft_dat=cr_pub++0pubmed
- Choi BM, Shin H, Lee JH, Bang JY, Lee EK, Noh GJ. Performance of the Surgical Pleth Index and Analgesia Nociception Index in Healthy Volunteers and Parturients. *Front Physiol* [Internet]. 2021 Mar 8 [cited 2025 Feb 3];12:554026. Available from: www.frontiersin.org
- Wang YL, Kong XQ, Ji FH. Effect of dexmedetomidine on intraoperative Surgical Pleth Index in patients undergoing video-assisted thoracoscopic lung lobectomy. *J Cardiothorac Surg*. 2020 Oct 2;15(1).
- Oh SK, Won YJ, Lim BG. Surgical pleth index monitoring in perioperative pain management: usefulness and limitations. *Korean J Anesthesiol* [Internet]. 2023 Feb 1 [cited 2025 Feb 3];77(1):31–45. Available from: <http://ekja.org/journal/view.php?doi=10.4097/kja.23158>
- Won YJ, Oh SK, Lim BG, Kim YS, Lee DY, Lee JH. Effect of surgical pleth index-guided remifentanyl administration on perioperative outcomes in elderly patients: a prospective randomized controlled trial. *BMC Anesthesiol* [Internet]. 2023 Dec 1 [cited 2025 Feb 3];23(1):1–10. Available from: <https://bmcanesthesiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12871-023-02011-5>
- Chen X, Thee C, Gruenewald M, Wnent J, Illies C, Hoecker J, et al. PERIOPERATIVE MEDICINE Comparison of Surgical Stress Index-guided Analgesia with Standard Clinical Practice during Routine General Anesthesia A Pilot Study [Internet]. Vol. 112, *Anesthesiology*. 2010. Available from: www.anesthesiology.org
- Hung SC, Hsu WT, Fu CL, Lai YW, Shen ML, Chen KB. Does surgical plethysmographic index-guided analgesia affect opioid requirement and extubation time? A systematic review and meta-analysis. *J Anesth*. 2022 Oct 1;36(5):612–22.
- Bonhomme V, Utela K, Hans G, Maquoi I, Born JD, Brichant JF, et al. Comparison of the Surgical Pleth Index™ with haemodynamic variables to assess nociception-anti-nociception balance during general anaesthesia. *Br J Anaesth* [Internet]. 2011 Jan 1 [cited 2025 Feb 3];106(1):101–11. Available from: <http://www.bjanaesthesia.org/article/S000709121733369X/fulltext>
- Laferrière-Langlois P, Morisson L, Jeffries S, Duclos C, Espitalier F, Richebé P. Depth of Anesthesia and Nociception Monitoring: Current State and Vision for 2050. *Anesth Analg*. 2024 Feb 1;138(2):295–307.
- Guo J, Zhu W, Shi Q, Bao F, Xu J. Effect of surgical pleth index-guided analgesia versus conventional analgesia techniques on fentanyl consumption under multimodal analgesia in laparoscopic cholecystectomy: a prospective, randomized and controlled study. *BMC Anesthesiol* [Internet]. 2021 Dec 1 [cited 2025 Feb 3];21(1):1–9. Available from: <https://bmcanesthesiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12871-021-01366-x>
- Hung KC, Huang YT, Kuo JR, Hsu CW, Yew M, Chen JY, et al. Elevated Surgical Pleth Index at the End of Surgery Is Associated with Postoperative Moderate-to-Severe Pain: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Diagnostics* [Internet]. 2022 Sep 1 [cited 2025 Feb 3];12(9):2167. Available from: <https://www.mdpi.com/2075-4418/12/9/2167/htm>
- Stasiowski MJ, Lyssek-Boro A, Kawka-Osuch M, Niewiadomska E, Grabarek BO. Possibility of Using Surgical Pleth Index in Predicting Postoperative Pain in Patients after Vitrectomy Performed under General Anesthesia. *Diagnostics*. 2024 Feb 1;14(4).
- Ledowski T. Objective monitoring of nociception: a review of current commercial solutions. *Br J Anaesth* [Internet]. 2019 Aug 1 [cited 2025 Feb 3];123(2):e312–21. Available from: <http://www.bjanaesthesia.org/article/S0007091219302284/fulltext>