

Aplicación de la tomografía computarizada espectral en la caracterización de lesiones malignas de mama: Utilización del Z efectivo y mapa de yodo como biomarcadores.

Application of spectral computed tomography in the characterization of malignant breast lesions: Use of effective Z and iodine map as biomarkers.

Autor:

Zurita Andrea

Médico posgradista R3. Servicio de Radiología. Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA). Guayaquil, Ecuador.

Palabras clave: Tomografía computarizada espectral, mama, lesiones malignas, Z efectivo, mapa de yodo.

Key words: Spectral computed tomography, breast, malignant lesions, effective Z, iodine map.

Comité de ética: Para la realización de este estudio fue autorizado el manejo confidencial de datos de las pacientes, por parte del Hospital de Solca, Guayaquil.

Correo para correspondencia del autor principal:
andrea.zurita89@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4980-7761>

Fecha de recepción:
Diciembre 2025.

Fecha de aceptación:
Diciembre 2025.

Resumen: La tomografía computarizada espectral (TCE), también conocida como tomografía dual-energy, constituye una herramienta en la evaluación de lesiones mamarias. A diferencia de la tomografía convencional, la TCE permite la adquisición de imágenes a diferentes niveles energéticos, lo que posibilita la obtención de parámetros cuantitativos como el número atómico efectivo (Z efectivo) y el mapa de yodo, incrementando la capacidad de caracterización de estas¹.

El objetivo de este estudio fue describir el valor de la TCE en la caracterización de lesiones malignas de mama, a través del análisis de Z efectivo y mapa de yodo, y compararlos con los hallazgos en pacientes sin patología maligna.

Se realizó un estudio descriptivo en 84 pacientes femeninas sometidas a tomografía de tórax con un tomógrafo espectral en el Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil, entre enero y mayo de 2025. Se incluyeron 42 pacientes sanas y 42 con diagnóstico confirmado de cáncer de mama. Se evaluaron unidades Hounsfield, valores de Z efectivo y concentraciones en mapa de yodo.

En las pacientes sanas, los valores de Z efectivo se ubicaron entre 6.68–7.68 y las concentraciones en mapa de yodo fueron ≤ 0.98 mg/ml. En contraste, las pacientes con cáncer presentaron valores de Z efectivo entre 7.68–8.18 y mapa de yodo predominantemente entre 0.98–1.98 mg/ml.

En cuanto a las unidades Hounsfield, las lesiones benignas mostraron valores mayoritariamente negativos, mientras que las malignas se concentraron en rangos de 38–68 HU.

Estos resultados evidencian que los parámetros derivados de la TCE permiten diferenciar de manera objetiva entre tejido sano y lesiones malignas, aportando información cuantitativa reproducible que complementa los hallazgos morfológicos.

La integración del Z efectivo y del mapa de yodo en la práctica clínica podría optimizar la caracterización de lesiones mamarias sospechosas, favorecer la detección precoz y mejorar la planificación terapéutica¹.

Abstract: Spectral computed tomography (SCT), also known as dual-energy computed tomography, is a valuable tool in the evaluation of breast lesions. Unlike conventional computed tomography, SCT enables image acquisition at different energy levels, allowing the extraction of quantitative parameters such as effective atomic number (effective Z) and iodine maps, thereby enhancing lesion characterization¹.

The objective of this study was to describe the value of SCT in the characterization of malignant breast lesions through the analysis of effective Z and iodine maps, and to compare these findings with those observed in patients without malignant pathology.

A descriptive study was conducted in 84 female patients who underwent chest computed tomography using a spectral CT scanner at the Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil between January and May 2025. The study population included 42 healthy patients and 42 patients with a confirmed diagnosis of breast cancer. Hounsfield units, effective Z values, and iodine map concentrations were evaluated.

In healthy patients, effective Z values ranged from 6.68 to 7.68, and iodine map concentrations were ≤ 0.98 mg/mL. In contrast, patients with breast cancer demonstrated effective Z values between 7.68 and 8.18, with iodine map concentrations predominantly ranging from 0.98 to 1.98 mg/mL.

Regarding Hounsfield units, benign lesions predominantly exhibited negative values, whereas malignant lesions clustered within a range of 38–68 HU.

These results demonstrate that SCT-derived parameters allow objective differentiation between normal tissue and malignant lesions, providing reproducible quantitative information that complements morphological findings.

The integration of effective Z and iodine mapping into clinical practice may optimize the characterization of suspicious breast lesions, facilitate early detection, and improve therapeutic planning¹.

Introducción

Las técnicas convencionales de imagen para la evaluación de la mama, como la mamografía y la ecografía, constituyen la base del diagnóstico inicial del cáncer de mama; sin embargo, presentan limitaciones inherentes, particularmente en pacientes con mamas densas o en lesiones con características morfológicas atípicas. Estas limitaciones pueden dificultar la detección temprana y la adecuada caracterización de las lesiones, condicionando retrasos diagnósticos en un subgrupo relevante de pacientes.

En Ecuador, el cáncer de mama representa una de las principales neoplasias malignas en la población femenina y constituye una causa significativa de morbilidad y mortalidad. De acuerdo con datos oficiales del Ministerio de Salud Pública, se registraron más de 3.900 casos nuevos en 2022, con proyecciones que estiman un incremento progresivo del número de casos hacia el año 2035, superando los 5.000 diagnósticos anuales, y con una proporción considerable de pacientes diagnosticadas en estadios avanzados, lo que impacta negativamente en el pronóstico y las opciones terapéuticas².

La resonancia magnética (RM) mamaria se reconoce como una herramienta de alta sensibilidad para la detección y caracterización del cáncer de mama; no obstante, su uso puede verse limitado por factores como la disponibilidad, el costo, el tiempo de adquisición y la presencia de contraindicaciones relativas o absolutas, incluyendo pacientes con dispositivos metálicos incompatibles o con deterioro de la función renal que restringe la administración de gadolinio. Estas limitaciones refuerzan la necesidad de explorar métodos de imagen complementarios que sean accesibles y que aporten información cuantitativa adicional¹.

En este contexto, la tomografía computarizada espectral ha emergido como una modalidad prometedora, al permitir la obtención de parámetros cuantitativos más allá de la atenuación convencional, como la densidad de yodo y el número atómico efectivo (Z efectivo).

Los avances en tomografía computarizada de doble energía y, más recientemente, en tomografía computarizada espectral de doble capa, han ampliado las aplicaciones clínicas de esta tecnología, proporcionando información funcional y tisular con potencial valor diagnóstico en diversas patologías oncológicas^{3,4}.

Estudios recientes han demostrado que la tomografía computarizada espectral aplicada a la mama puede mejorar la detección y caracterización de lesiones malignas, así como correlacionarse con características pronósticas y subtipos moleculares del cáncer de mama.

En particular, el uso de parámetros espectrales cuantitativos ha mostrado utilidad en la diferenciación entre tejido mamario benigno y maligno, sugiriendo su potencial como biomarcadores de imagen no invasivos que complementen las técnicas convencionales^{4,6}.

Materiales y métodos

Se diseñó un estudio descriptivo retrospectivo realizado en la Unidad de Imagenología de SOLCA Guayaquil, durante los meses de enero a mayo del año 2025.

La población estuvo conformada por 84 mujeres, distribuidas en dos grupos: 42 pacientes sin patología maligna mamaria (controles sanos) y 42 pacientes con diagnóstico histológico confirmado de cáncer de mama.

El equipo utilizado fue un tomógrafo espectral Philips. Los estudios se realizaron en fase venosa tardía (70–90 segundos tras la administración de contraste yodado endovenoso), empleando reconstrucciones virtuales monoenergéticas (VMI) a 40 keV, mapas de yodo y análisis de número atómico efectivo.

Se registraron como variables principales:

- Valores de unidades Hounsfield (UH).
- Concentración de yodo (mg/ml).
- Valores de Z efectivo.

Para el análisis estadístico, se aplicó un enfoque descriptivo comparativo entre ambos grupos (sano vs maligno), evaluando la distribución de valores y rangos característicos en cada parámetro.

Resultados

Se incluyeron 84 pacientes, de los cuales 42 presentaron lesiones malignas y 42 correspondieron a tejido mamario sano, a las que se realizaron mediciones de cada variable. Adicionalmente, se citan tres ejemplos de casos de pacientes correspondientes a las Figuras 2, 3 y 4 respectivamente.

Unidades Hounsfield (UH):

El tejido sano se distribuye en rangos predominantemente negativos (-112 a 0 UH), con el 76% de los casos ≤ 0 UH. En contraste, las lesiones malignas mostraron un predominio en valores positivos, concentrándose en el rango 38–68 UH (57% de los casos), con extensión hasta 130 UH en los tumores más sólidos, ver Tabla 1.

Z efectivo:

El tejido mamario sano presentó valores entre 6.6–7.6 (media 7.2), mientras que las lesiones malignas se distribuyeron entre 7.7–9.1, con el 77% de los tumores ≥ 8.0 , ver Tabla 2.

Densidad de yodo (mg/ml):

En tejido sano, el 100% de los casos presentó valores ≤ 0.98 mg/ml (media 0.62). En lesiones malignas, se evidenció un desplazamiento hacia valores elevados, con la mayoría entre 0.98–1.98 mg/ml (69 %), y un subgrupo con concentraciones ≥ 2.0 mg/ml, alcanzando un máximo de 3.7 mg/ml, ver Tabla 3.

Los tres parámetros cuantitativos (UH, yodo y Z efectivo) mostraron diferencias consistentes entre tejido sano y lesiones malignas, ver Tabla 4; lo que respalda su utilidad diagnóstica.

Tabla 1. Tabla comparativa de las UH de tejido sano vs lesiones malignas.

Unidades Hounsfield (UH)			
Tejido sano		Lesiones malignas	
Rango UH	Pacientes	Rango UH	Pacientes
-112 a -82	8	-82 a -52	1
-82 a -52	6	8 a 38	8
-52 a -22	8	38 a 68	24
-22 a 8	10	68 a 98	7
8 a 38	8	98 a 128	1
38 a 68	2	128 a 158	1

Fuente: Unidad de Imagenología. Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil, Ecuador.

Tabla 2. Tabla comparativa valores Z efectivo de tejido sano vs lesiones malignas.

Z efectivo			
Rango	Tejido sano	Rango	Tejido sano
6.6–6.9	16	7.7–7.9	14
7.0–7.3	18	8.0–8.3	18
7.4–7.6	8	8.4–8.7	8
		≥ 8.8	2

Fuente: Unidad de Imagenología. Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil, Ecuador.

Tabla 3. Tabla comparativa densidad de yodo en tejido sano vs lesiones malignas.

Densidad de Yodo (mg/ml)			
Rango	Tejido sano	Rango	Lesiones malignas
≤ 0.5	30	0.98–1.48	15
0.51–0.98	12	1.49–1.98	14
		1.99–2.98	8
		≥ 2.99	5

Fuente: Unidad de Imagenología. Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil, Ecuador.

Tabla 4. Resumen de resultados.

Parámetro	Tejido sano / Lesiones benignas	Lesiones malignas
Unidades Hounsfield (UH)	Predominio en valores negativos (–112 a 0 UH).	Predominio en valores positivos
	76% ≤ 0 UH	57% en 38–68 UH. Extensión hasta 130 UH
Densidad de yodo (mg/ml)	≤ 0.98 mg/ml en el 100% de los casos.	Mayoría entre 0.98–1.98 mg/ml (69%).
	Media: 0.62 mg/ml	Subgrupo ≥ 2.0 mg/ml (máx. 3.7)
Z efectivo	Rango 6.6–7.6.	Rango 7.7–9.1.
	Media: 7.2	77% ≥ 8.0

Fuente: Unidad de Imagenología. Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil, Ecuador.

Tabla 5. Comparación de parámetros espectrales entre tejido mamario sano y lesiones malignas.

Parámetro	Tejido sano	Lesión maligna	Prueba	P	AUC	Corte	Sens.	Esp.
UH	-29.31 ± 46.78	53.43 ± 28.37	t pareada	<0.001	0.959	>26.3	90.5%	90.5%
Yodo (mg/ml)	0.11 ± 0.16	1.09 ± 0.64	Wilcoxon	<0.001	0.974	>0.33	92.9%	90.5%
Z efectivo	6.99 ± 0.40	7.88 ± 0.34	t pareada	<0.001	0.974	>7.4	97.6%	83.3%

Fuente: Unidad de Imagenología. Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil, Ecuador.

En 42 pacientes, las lesiones malignas mostraron valores superiores a los del tejido mamario sano para UH (53.43 ± 28.37 vs -29.31 ± 46.78), densidad de yodo (1.09 ± 0.64 vs 0.11 ± 0.16 mg/ml) y Z efectivo (7.88 ± 0.34 vs 6.99 ± 0.40), con diferencias estadísticamente significativas en análisis pareado ($p < 0.001$).

La capacidad discriminativa para diferenciar lesión vs tejido sano fue alta: UH AUC=0.959 (IC95% 0.913–0.991), yodo AUC=0.974 (IC95% 0.942–0.995) y Z efectivo AUC=0.974 (IC95% 0.943–0.994).

El punto de corte óptimo (Youden) fue >26.3 UH, >0.33 mg/ml yodo y >7.4 para Z efectivo.

En lesiones malignas, Z efectivo y densidad de yodo mostraron correlación positiva fuerte ($r=0.971$; $p < 0.001$), ver Tabla 5 y Figura 1.

Figura 1. Relación entre densidad de yodo y Z efectivo

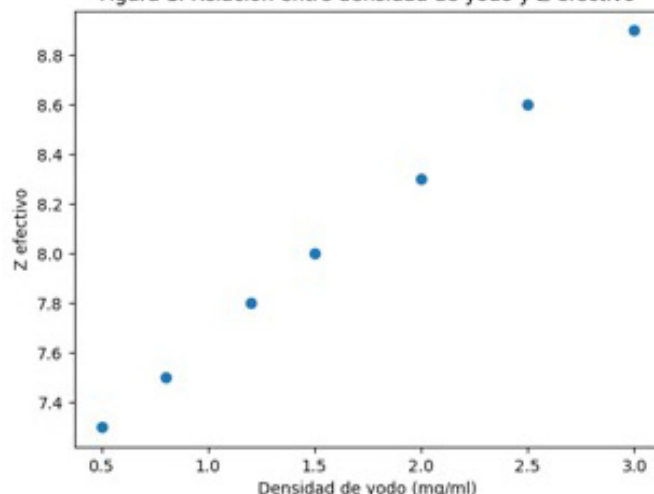


Figura 1. Diagrama de dispersión que muestra la relación entre la densidad de yodo y el número atómico efectivo en lesiones malignas de mama, evidenciando una correlación positiva fuerte entre ambos parámetros.

Fuente: Unidad de Imagenología. Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil, Ecuador.

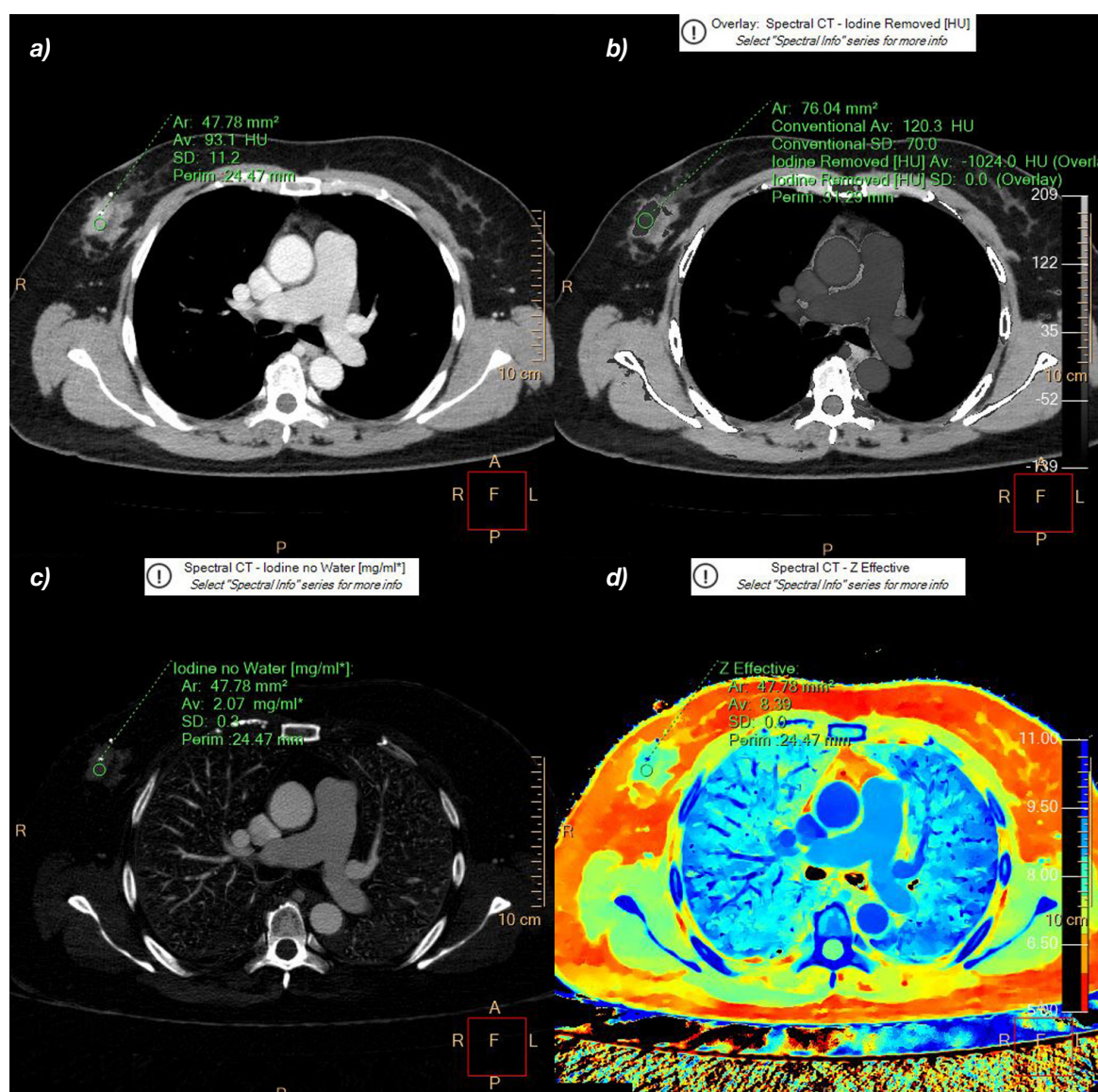


Figura 2 (a, b, c, d). Imagen de posprocesamiento TCE. Caso 1: a) En mama derecha se identifica lesión nodular sólida heterogénea, de márgenes irregulares, espiculados, con calcificaciones en su interior, localizada en el cuadrante superior externo, plano medio, de aproximadamente 26 x 15 mm en su mayor diámetro, ávido realce posterior al contraste. b, c) Mapa de yodo con valores aproximados de 2 mg/ml, d) Z efectivo con valores elevados 8.3, superiores al parénquima mamario circundante. Los hallazgos espectrales sugieren mayor vascularización y composición tisular compatible con tejido sólido activo/sospechoso.

Fuente: Unidad de Imagenología. Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil, Ecuador.

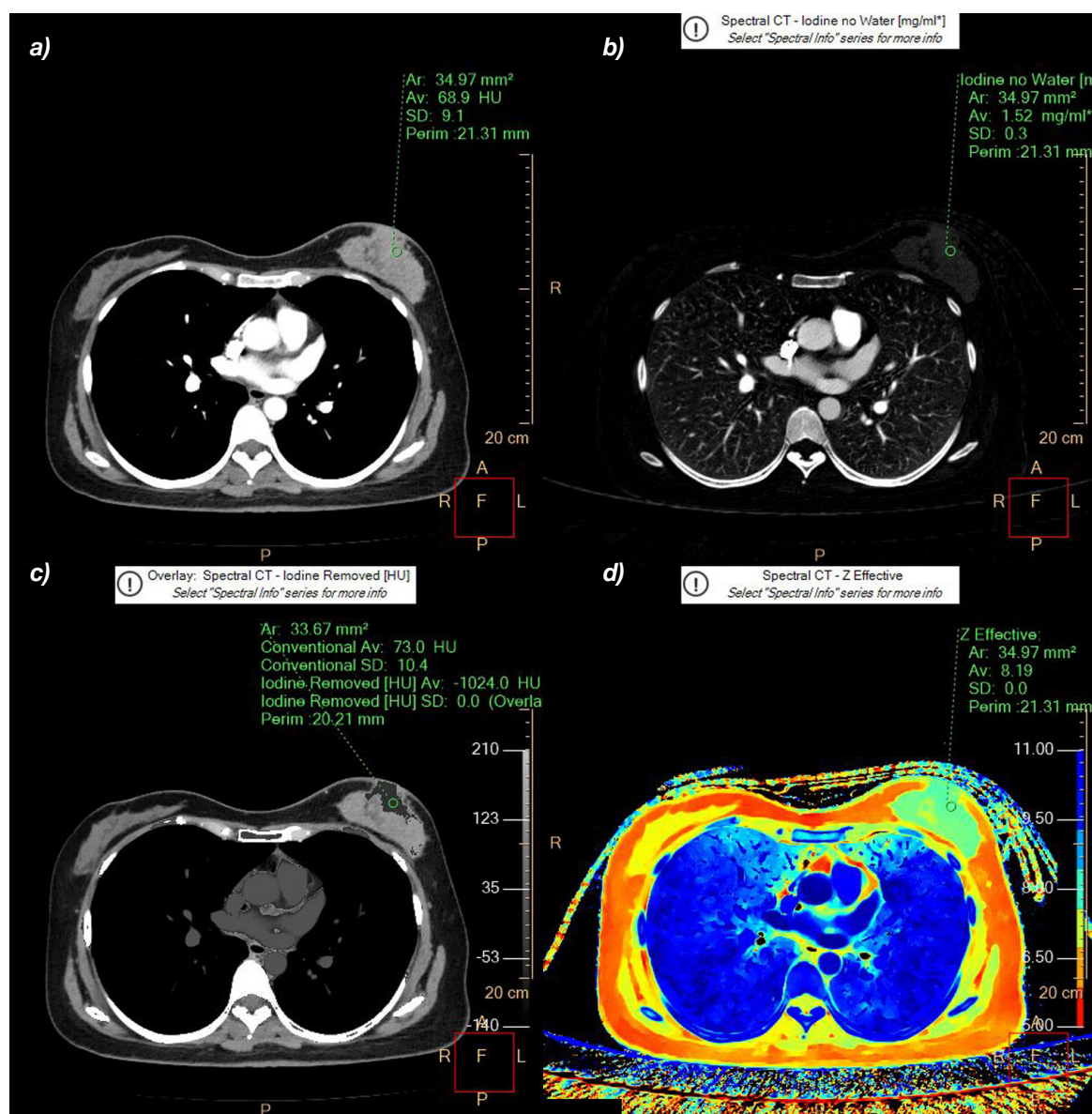


Figura 3 (a, b, c y d). Imagen de posprocesamiento TCE. Caso 2: a) En mama izquierda se identifica lesión nodular sólida heterogénea, de márgenes microlobulados, ocupa casi todos los cuadrantes, de aproximadamente 64 x 36 mm en su mayor diámetro, ávido realce posterior al contraste. b, c) Mapa de yodo con valores aproximados de 1.5 mg/ml, d) Z efectivo valores elevados 8.1, superiores al parénquima mamario circundante. Los hallazgos espectrales sugieren mayor vascularización y composición tisular compatible con tejido sólido activo/sospechoso.

Fuente: Unidad de Imagenología. Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil, Ecuador.

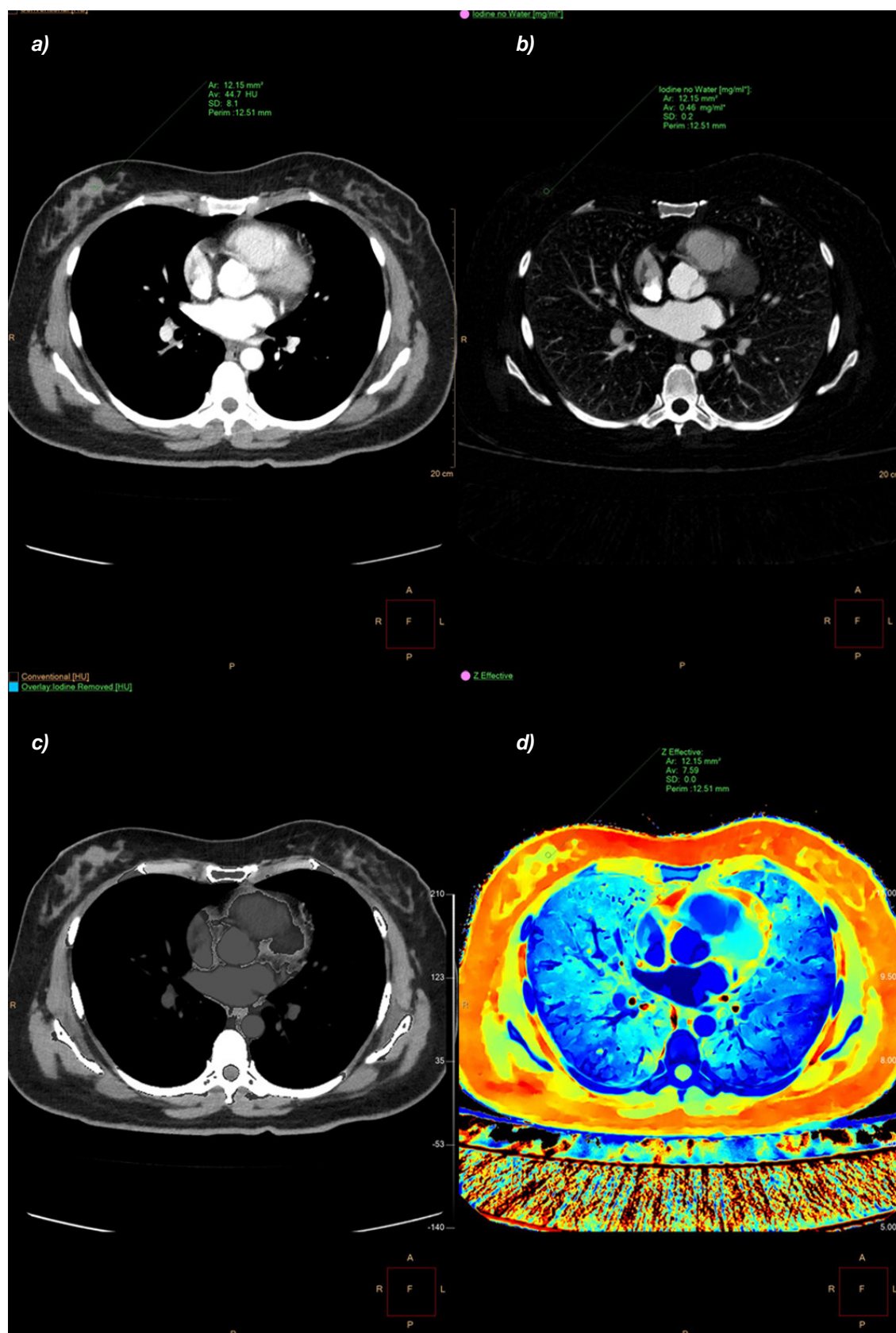


Figura 4 (a, b, c, d). Imagen de posprocesamiento TCE. Caso 3: a) En mama derecha se identifica lesión nodular sólida heterogénea, de márgenes circunscritos, localizada en cuadrante inferior interno, de aproximadamente 14 x 11 mm en su mayor diámetro, sin realce posterior al medio de contraste. b, c) Mapa de yodo con valores aproximados de 0.4 mg/ml, d) Z efectivo con valores elevados 7.5, superiores al parénquima mamario circundante. Valores que no sugieren sospecha diagnóstica, se correlaciona con ultrasonido y correspondería a quiste complicado.

Fuente: Unidad de Imagenología. Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil, Ecuador.

Discusión

La TCE emplea adquisiciones en distintos niveles de energía (usualmente 80 y 140 kVp), lo que posibilita analizar la composición tisular y su comportamiento espectral. A diferencia de la TC convencional, esta técnica permite la generación de imágenes virtuales monoenergéticas, mapas de yodo para cuantificar el realce vascular y técnicas de sustracción de calcio.

El mapa de yodo facilita la cuantificación del contraste dentro del tejido, útil en lesiones sospechosas con componente angiogénico. El número atómico efectivo estima la composición tisular a partir de su respuesta espectral, lo que contribuye a diferenciar entre estructuras benignas y malignas.

Vrbaski et al. (2023), reportaron que los valores promedio de Z efectivo difieren entre tejidos: alrededor de 5.94 en tejido adiposo, 7.03 en tejido fibro-glandular y 7.40 en tejido tumoral. Estas diferencias, aunque sutiles, pueden ser explotadas para mejorar la caracterización tisular y servir como complemento a otras variables espectrales y morfológicas.

No obstante, aún no se han definido umbrales diagnósticos universalmente aceptados, y el uso de Z efectivo como marcador de malignidad sigue siendo objeto de estudio³.

El protocolo de adquisición en TCE para mama puede variar según el fabricante, pero en general, se recomienda realizar la adquisición en fase venosa tardía (70-90 segundos después de la inyección de contraste yodado), con cortes finos (1-2 mm), y reconstrucciones en VMI de baja energía (por ejemplo, 40 keV), imágenes de yodo y mapas de Z efectivo.

No se requiere una posición especial como en la mamografía; el paciente suele estar en decúbito supino con ambos brazos por encima de la cabeza. Algunos centros especializados pueden optar por posicionamiento prono con el busto suspendido en sistemas dedicados, aunque esto es menos frecuente.

Aplicaciones clínicas en lesiones mamarias

La TCE permite caracterizar lesiones mamarias con mayor detalle al evaluar el grado de realce tras la administración de contraste intravenoso, lo cual es clave para diferenciar lesiones benignas (como fibroadenomas o quistes complejos) de carcinomas invasivos.

Los mapas de yodo permiten cuantificar la captación del contraste, correlacionándose con el componente

angiogénico tumoral. Además, las imágenes VMI de baja energía (por ejemplo, 40 keV) mejoran la conspicuidad de lesiones hipervasculares y pueden detectar tumores que pasan desapercibidos en TC estándar.

También ha demostrado utilidad en la evaluación de ganglios axilares sospechosos, permitiendo identificar metástasis ganglionares mediante análisis espectral.

Ventajas de la TCE en mama

Una de las principales ventajas de la TCE es su capacidad para aumentar el contraste entre el tumor y el tejido mamario circundante mediante VMI, mapas de yodo y análisis del Z efectivo, lo que mejora la visualización de lesiones sutiles o isodensas. La cuantificación objetiva del realce permite establecer umbrales de sospecha con mayor precisión.

La TCE también ofrece la posibilidad de obtener múltiples tipos de reconstrucciones a partir de un mismo estudio, evitando la necesidad de estudios adicionales. En ciertos casos, puede representar una alternativa diagnóstica útil cuando la RM no está disponible o está contraindicada.

Limitaciones actuales

La TCE, al tratarse de una técnica que utiliza múltiples niveles de energía, puede implicar una dosis de radiación superior a la de la mamografía convencional, aunque los avances tecnológicos han permitido reducirla progresivamente. Además, su implementación clínica generalizada aún se ve limitada por la disponibilidad de equipos dual-energy, y la mayoría de los estudios disponibles corresponden a series de tamaño limitado o contextos de investigación.

Perspectivas futuras

Se prevé que la TCE pueda incorporarse en protocolos de cribado para poblaciones de alto riesgo, especialmente aquellas con contraindicación a la RM.

Su combinación con técnicas de perfusión y su integración con algoritmos de inteligencia artificial permitirán automatizar la cuantificación del realce y mejorar la caracterización tumoral.

Asimismo, el desarrollo de estudios prospectivos y multicéntricos validará su eficacia como herramienta diagnóstica complementaria.

Conclusiones

La TCE representa una herramienta complementaria de gran valor en el estudio de la patología mamaria, especialmente en pacientes con contraindicaciones para RM o con hallazgos indeterminados en otras modalidades.

Aporta ventajas en la caracterización, cuantificación del realce, evaluación del Z efectivo y mejora del contraste de lesiones, lo que contribuye a una detección más precisa y una mejor planificación terapéutica en el cáncer de mama.

Declaración de Conflicto de interés: La autora declara no tener ningún conflicto de interés.

Fuente de financiamiento: Recursos departamento de imágenes Hospital de Lucha contra el Cáncer del Ecuador (SOLCA) Guayaquil, Ecuador.

Grado de contribución de los autores: completo de única autora.

Bibliografía

1. McCollough CH, Leng S, Yu L, Fletcher JG. Dual- and Multi-Energy CT: Principles, Technical Approaches, and Clinical Applications. *Radiology*. 2015 Sep;276(3):637-53. doi: 10.1148/radiol.2015142631. PMID: 26302388; PMCID: PMC4557396.
2. Colegio de Médicos de Pichincha. (2025, 21 de octubre). En Ecuador, el cáncer de mama es el de mayor incidencia y mortalidad en mujeres. <https://colegiomedicodepichincha.org/en-ecuador-el-cancer-de-mama-es-el-de-mayor-incidencia-y-mortalidad-en-mujeres/>.
3. Vrbaski N, Faj D, Kazmierska J, et al. Breast Tissue Classification in Dual-Energy CT using Effective Atomic Number and Density from Mastectomy Samples. *arXiv preprint arXiv:2302.06979*. 2023.
4. Ma WM, Li J, Chen SG, Cai PQ, Chen S, Chen JT, Zhou CY, He N, Wu Y. Correlation between contrast-enhanced cone-beam breast computed tomography features and prognostic staging in breast cancer. *Br J Radiol*. 2022 Apr 1;95(1132):20210466. doi: 10.1259/bjr.20210466. Epub 2022 Jan 7. PMID: 34930038; PMCID: PMC9153710.
5. Ministerio de Salud Pública del Ecuador. (s. f.). Cifras de Ecuador – Cáncer de mama. <https://www.salud.gob.ec/cifras-de-ecuador-cancer-de-mama/>
6. Hasse FC et al. – Improvement of Breast Cancer Detection Using Dual-Layer Spectral CT.
7. Chen L, Xiao Z, Fu J, Huang J, Lan Y. The diagnostic performance of dual-layer spectral detector CT for distinguishing breast cancer biomarker expression and molecular subtypes. *Sci Rep*. 2024 Jan 17;14(1):1500. doi: 10.1038/s41598-024-51285-3. PMID: 38233452; PMCID: PMC10794198.
8. Xia, H., Chen, Y., Cao, A. et al. Differentiating between benign and malignant breast lesions using dual-energy CT-based model: development and validation. *Insights Imaging* 15, 173 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13244-024-01752-2>
9. Okada K, Matsuda M, Tsuda T, Kido T, Murata A, Nishiyama H, Nishiyama K, Yamasawa H, Kamei Y, Kurata M, Fukushima M, Kitazawa R, Mochizuki T. Dual-energy computed tomography for evaluation of breast cancer: value of virtual monoenergetic images reconstructed with a noise-reduced monoenergetic reconstruction algorithm. *Jpn J Radiol*. 2020 Feb;38(2):154-164. doi: 10.1007/s11604-019-00897-1. Epub 2019 Nov 4. PMID: 31686294.
10. Mann, RM, Kuhl, CK y Moy, L. Resonancia magnética con contraste para la detección del cáncer de mama. *J. Magn. Reson. Imaging* 50 (2), 377–390 (2019).
11. Van Hamersvelt, RW et al. Optimización de la concentración del agente de contraste en la angiografía por tomografía computarizada (ATC) mediante TC de bajo voltaje de tubo y de energía dual en múltiples proveedores: Un estudio con maniquí. *Int. J. Cardiovasc. Imaging* 34 (8), 1265–1275 (2018).