

Study of the application of Geographic Information Systems for the analysis of the behavior of oil spills in terrestrial and marine ecosystems. A systematic review between the years 2017 - 2022

Maria Cristina Emperatriz Espinoza Tongo, Estudiante ¹, Jessica Marleny Luján Rojas, Mg², Liana Ysabel Cárdenas Gutierrez, Mg³

Universidad Privada del Norte, Perú, N00167156@upn.pe¹

Universidad Privada del Norte, Perú, jessica.lujan@upn.pe²

Universidad Privada del Norte, Perú, liana.cardenas@upn.edu.pe³

Abstract – Geographic Information Systems (GIS) are currently applied in the evaluation of different eventualities that risk population health or have a great expansion in the territory, as is the case of oil spills. This review aims to study the application of GIS in oil spills from the analysis of research articles. The PRISMA methodology and eligibility criteria were applied, which consisted of the periodicity of the publication, language, IMRD structure, accessibility and research topic. Finding a total of 52 articles, it was determined that the most sensitive areas are marine (High Seas), coastal (beaches, dunes and bays), tropical and rivers. Likewise, the causes of spills were the collision of ships and the rupture of pipes. In the same way, the most applied GIS software was identified, these being ArcGIS (38.5%), Google Earth (5.8%), QGIS (3.8%), SNAP (7.7), among others. It is worth mentioning that the data was validated using statistical analyzes and in situ data. It was concluded that the occurrence of spills in marine and terrestrial areas, are mostly caused by the transport and the state of hydrocarbon pipelines, identifying itself as the main program applied to ArcGIS and validating the results with different techniques depending on the article.

Keywords – GIS, Oil pollution, Ecosystem, Oil slick

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.211>

ISBN: 978-628-95207-3-6 ISSN: 2414-6390

Estudio de la aplicación de Sistemas de Información Geográfica en el comportamiento de derrames de petróleo en ecosistemas terrestres y marinos. Una revisión sistemática entre los años 2017 – 2022

Maria Cristina Emperatriz Espinoza Tongo, Estudiante ¹, Jessica Marleny Luján Rojas, Mg², Liana Ysabel Cárdenas Gutierrez, Mg³

Universidad Privada del Norte, Perú, N00167156@upn.pe¹

Universidad Privada del Norte, Perú, jessica.lujan@upn.pe²

Universidad Privada del Norte, Perú, liana.cardenas@upn.edu.pe³

Resumen – Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), actualmente se aplican en la evaluación de distintas eventualidades que arriesgan la salud poblacional o tienen una gran expansión en el territorio, como es el caso de los derrames de petróleo. Esta revisión tiene como objetivo estudiar la aplicación de SIG en los derrames de petróleo a partir del análisis de artículos de investigación. Se aplicó la metodología PRISMA y criterios de elegibilidad, el cual consistió en la periodicidad de la publicación, idioma, estructura IMRD, accesibilidad y tema de investigación. Hallándose un total de 52 artículos, se determinó que las zonas más sensibles son las marinas (Alta Mar), costeras (playas, dunas y bahías), tropicales y ríos. Asimismo, las causas de derrames fueron la colisión de barcos y ruptura de tuberías. De igual manera se identificó los softwares GIS más aplicados siendo estos ArcGIS (38.5%), Google Earth (5.8%), QGIS (3.8%), SNAP (7.7), entre otros. Cabe mencionar que los datos se validaron usando análisis estadísticos y Datos in situ. Se concluyó que la ocurrencia de los derrames en zonas marinos y terrestres, son causados en su mayoría por el transporte y el estado de tuberías del hidrocarburo, identificándose como principal programa aplicado a ArcGIS y validando los resultados con distintas técnicas dependiendo al artículo.

Palabras Claves—SIG, Contaminación petrolera, Ecosistema, Marea Negra.

Abstract – Geographic Information Systems (GIS) are currently applied in the evaluation of different eventualities that risk population health or have a great expansion in the territory, as is the case of oil spills. This review aims to study the application of GIS in oil spills from the analysis of research articles. The PRISMA methodology and eligibility criteria were applied, which consisted of the periodicity of the publication, language, IMRD structure, accessibility and research topic. Finding a total of 52 articles, it was determined that the most sensitive areas are marine (High Seas), coastal (beaches, dunes and bays), tropical and rivers. Likewise, the causes of spills were the collision of ships and the rupture of pipes. In the same way, the most applied GIS software was identified, these being ArcGIS (38.5%), Google Earth (5.8%), QGIS (3.8%), SNAP (7.7), among others. It is worth mentioning that the data was validated using statistical analyzes and in situ data. It was concluded that the occurrence of spills in marine and terrestrial areas, are mostly caused by the transport and the state of hydrocarbon pipelines, identifying itself as the main program applied to ArcGIS and validating the results with different techniques depending on the article.

Keywords -- GIS, Oil pollution, Ecosystem, Oil slick

I. INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de accidentes, especialmente los derrames de petróleo, ha ido en aumento. En la presente década se han presentado hasta 175 casos, vertiendo un total de 32,000 barriles de este contaminante [1]. Estos accidentes, han ocurrido mayormente en ambientes costeros, por lo que las labores de limpieza carecen de la efectividad y rapidez requerida [2]. Lo que provoca que los efectos adversos en la contaminación de ecosistemas, sea inevitable.

Las comunidades nativas son las más vulnerables puesto que se sustentan con los recursos que proveen estos ecosistemas, y al carecer de atención médica comprometen la salud de la población. En la provincia de Loreto, Perú, se registró un caso de contaminación masiva de petróleo en la quebrada de Cuninico, afectando a las comunidades nativas de San Francisco, Nueva Esperanza y Cuninico, un 50,54 % de los pobladores poseía valores de mercurio por encima del rango, y 16,81% sobre el rango del plomo [3]. Esto ocurre mayormente en zonas amazónicas, donde tanto los centros médicos como una adecuada supervisión de operaciones no se desarrollan de manera correcta, apartando la proporcionalidad que debe de existir en producción, calidad ambiental y análisis de riesgo.

Referente a ello, el medio ambiente al ser un recurso que ofrece distintos servicios, es un sistema altamente vulnerable ante aquellos accidentes, en estos casos es importante realizar estudios fisicoquímicos, y biológicos y batimétricos del área [4,5,6]. Sin embargo, representan análisis peligrosos que exponen la salud del analista.

Teniendo en cuenta el peligro de exposición ante este contaminante y los efectos perjudiciales que tiene hacia la comunidad, la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) representa una gran ventaja, pues facilita la recolección de eventos de contaminación por petróleo, y en base a ello se desarrollan modelos de predicción siguiendo el análisis de incertidumbre [7,8]. El estudio de [7], a través de la exploración visual, logró detectar más de 20 eventos de contaminación por petróleo, el caso más significativo cubrió 26 km² del canal de Suez. Lo cual, se puede complementar integrando enfoques de sensibilidad ambiental [9] para diagnosticar el estado ambiental del perímetro y sus efectos.

Por lo anteriormente mencionado, esta investigación se realizó la siguiente pregunta: ¿De qué manera la aplicación de

SIG examina el comportamiento de derrames de petróleo en ecosistemas terrestres y acuáticos? Y para responder a aquella interrogante, esta revisión sistemática tuvo por objetivo estudiar la aplicación de SIG en el comportamiento de derrames de petróleo.

II. METODOLOGÍA

Para la presente revisión sistemática se aplicó la metodología PRISMA, misma que incluye una nueva guía de informes que refleja los avances para sintetizar estudios, a comparación con la anterior (PRISMA 2009), esta ha modificado su estructura, provocando una estandarización de la información y aumentando la calidad de los reportes en las revisiones sistemáticas, lo que permite evaluar la idoneidad de los métodos y por lo tanto la confiabilidad de los hallazgos [10].

Los criterios de elegibilidad consistieron en la antigüedad de los artículos (comprendidos entre los años 2017-2022), la accesibilidad al documento, el tema de investigación como “Ciencias ambientales”, el idioma (sea este español, inglés, francés o portugués) y por último que presenten una estructura IMRD. Por lo que, para los criterios de exclusión, se descartaron documentos que no contenían las variables de investigación, o desarrollaban una estructura distinta, idiomas distintos a los señalados, y por último se descartaron documentos con temáticas de investigación diferentes.

Como búsqueda inicial se establecieron las siguientes bases de datos: Scopus, Redalyc, Science Direct, Scielo, ResearchGate, Repositorios Institucionales y Revistas Internacionales. Asimismo, para manejar una búsqueda eficiente de la literatura, se aplicaron operadores booleanos para la inclusión o exclusión (and/or) en referencia a una o más variables en el rubro. Se obtuvieron un total de 125 documentos en esta primera etapa, los cuales en base a los criterios expuestos se descartaron 78 artículos, de los cuales solo fueron seleccionados 52 estudios. A continuación, en la Fig. 1 se muestra la selección de artículos a través de la metodología Prisma

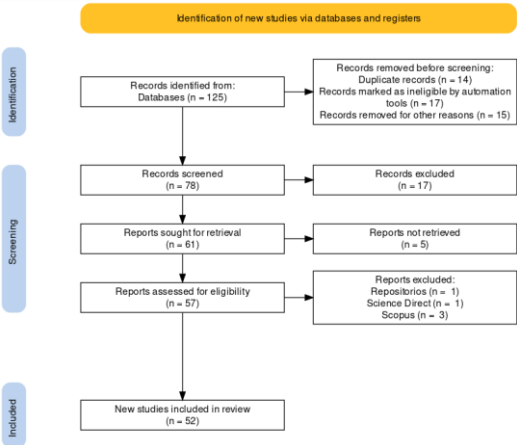


Fig. 1 Diagrama de Flujo para la selección de Literatura
Diagrama obtenido de PRISMA 2020 Statement.

III. RESULTADOS

Con un adecuado manejo de las bases de datos y siguiendo los criterios de exclusión e inclusión, se obtuvo un total de 52 artículos como se muestra en la Fig. 2

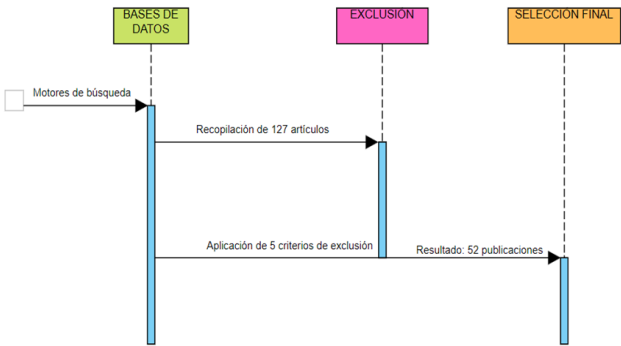


Fig. 2 Proceso de selección de datos
Diagrama obtenido de Visual Paradigm Edition.

En la tabla 1, se señalan las particularidades de los estudios seleccionados, considerando 2 factores distintivos, que, al relacionarlos con la categorización de los 52 artículos seleccionados, se obtiene el porcentaje de su magnitud y se observa ciertas tendencias.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTUDIOS

Tipo de documento	F	%	Año de publicación	F	%
Artículos científicos	49	94.2	2017	8	15.4
Revisiones sistemáticas	3	5.8	2018	7	13.5
			2019	4	7.7
			2020	14	26.9
			2021	15	28.8
			2022	4	7.7
TOTAL	52	100	TOTAL	52	100

La tabla II caracteriza a las investigaciones seleccionados identificando al área afectada por los derrames de petróleo, así como la causa de este. Además, se da a conocer la zona de impactación del ocurrido accidente.

TABLA II
CARACTERIZACIÓN DE DERRAMES SEGÚN ZONA DE ESTUDIO, TERRENO AFECTADO Y CAUSA DE CONTAMINACIÓN

Cont.	Zona de estudio	Terreno Afectado	Causa de contaminación	Ref.
África	Canal Suez cerca de la zona costera de Port Said (entrada Norte del canal ¹)	1964 km ²	Intenso Tráfico Marítimo de las Plataformas Petroleras	[11]
	9 comunidades de Reino, Delta Níger	Suelos agrícolas	Derrames de crudo ilegal o accidental	[12]
	Mar de Bohai y el mar Amarillo	Huangdao "11.22", bahía de	Explosión de oleoductos de la refinería Sinopec	[13]

América del Norte		Tuandao y áreas cercanas a la bahía de Fushan	Corp.	
	Base del río Wehie	10 km y 5 km con flujos de 30 m ³ /s y 60 m ³ /s	Contaminación inducida (in situ)	[14]
	Estrecho de Palk	Kodiayakara i hasta Puente Pamban (240 km)	Transporte de partículas de hidrocarburos	[15]
	Distrito de Karawang	Costa Karawang	Fugas de la Plataforma Petrolera Pertamina	[16]
	Línea costera de Isla Pari	14,5 km de costa	Exploración en alta Mar (barcos)	[17]
	Costa de la Provincia de Sumatra del sur	Disminución de 4.386 Ha del manglar	Tráfico de embarcaciones (buques)	[18]
	Distritos de la provincia Kalimantan	-	Extracción del petróleo	[19]
	Tramo Luoqi	8,6 km (simulación)	Colisión frecuente de barcos del puerto Chaotianmen	[20]
	Costa de la isla Madura, provincia de Java Oriental	4 millas náuticas de la costa sur	Plataformas de petróleo	[21]
	Bahía Matanzas	Perímetro de la costa 19 km	Avería en la descarga de un buque	[22]
	Simulación de 12 Mares Interamericanos	Desviación de 12km a 24.7 km	Simulación	[23]
	Bahía de Banderas costa occidental	12 214 km ²	Residuos y contaminantes suspendidos	[24]
	Zona tropical del Lote 92, Loreto	Pérdida de 2874,10 ha de cobertura vegetal	Construcción de vías de acceso, instalación de pozos	[25]
	Costa del Perú	-----	Accidente del buque Mare Doricum de la empresa Repsol	[26]
	Zona tropical del pacífico Sudoriental	10 km del océano pacífico	Pozos activos de la empresa Savia Perú S.A.	[27]
	20.4 ha del Poliducto Esmeraldas	4.6 hectáreas del terreno	Falla de una abrazadera y 7 derrames de “Eppetroecuador”	[28]
	Columna de agua (3 bioensayos)	Proporción de petróleo	Contaminación inducida (Repsol)	[29]

América del sur	para cada especie	crudo y agua: 1:80; 1:20 y 1:9	
	Costa de Paraty.	Playas de Paraty	Derrames de petróleo (TEBIG). [30]
	Río Acauca y Bojaba	Pérdida de 0.33km ²	Extracción y transporte de petróleo. [31]
	Modelación de 269. 5 km de zona montañosa central	Alrededor de los 141,189, 221 y 245 kilómetros	Rupturas de tuberías y ductos [32]
	Campo Ancón	1514 m ³ de suelo	Derrame de los oleoductos (Pacifpetrol) [33]
	Nororiente Ecuatoriano	52 km ² del Bloque Cuyabeno-Tipishca	Fallas mecánicas, corrosión de pozos en zonas de producción y líneas de flujo [34]
	Mar de Salish	1,5 millas costa	Derrame de petróleo. [35]
	Campo Norte de Sudán del Sur.	11.500, 1 000 y 6 000 m ² de mar	Ruptura de tuberías en centro de explotación petrolera. [36]
	Dunas Costeras Park y el Oasis “Bosco Pantano”	18, 000 km ² de arena	Transporte de partículas o sedimentos de petróleo [37]
	Superficie y fondo marino	2500 km ² de mar	Escenarios hipotéticos [38]
	Simulaciones del mar de Barent	11 429 km ² aguas superficiales 1528 km ² zona costera	Simulación de un derrame de petróleo en el mar [39]
	Zonas cerca del oleoducto y a 1km de la tubería	4695 km de la zona	Construcción y operación de gasoductos [40]

Simulación de un derrame en un modelo terrestre	6371 m ² de suelo	Mayorderrame de petróleo en el Ártico	[41]
---	------------------------------	---------------------------------------	------

Se ha optado colocar con dirección inclinada del texto en la columna Cont. (Continente) para mejorar la percepción de información de los casos presentados.

A continuación, se identifican las herramientas utilizadas para analizar los derrames anteriormente descritos.

TABLA III
CARACTERIZACIÓN SEGÚN EL SIG APLICADO, EL SATÉLITE Y LA
TÉCNICA DE VALIDACIÓN

SIG	Satélite	Técnica de Validación	Referencia
ArcGIS 9.2 - ArcGIS 10.6 ArcGIS Pro 2.3.1 ¹⁰	Landsat 5,7 y 8 ¹	Análisis ANOVA ²	[24] ¹ [15] ² [18] [32] [42] ³ [43]
			[44] ⁴ [45] ⁵ [46]
			[47] ⁶ [49] ⁷ [12] ⁸ [30]
	Modis ¹	Correlación de indicadores ⁸	[33]
	WorldView 3 ⁹	Comparación de simulaciones ⁷	[34] [21]
	Landsat ³		[50] ⁹ [51] ¹⁰ [25] ¹¹
	Landsat8 Oli ⁴	Datos in Situ ^{3,4}	
		Distribución Gaussiana ⁶	
ENVI	Landsat 5, 7 y 8	Datos in Situ	[41]
ENVI 5.4	PeruSAT-1	-----	[52]
ERDAS	Landsat	Matriz de confusión y coeficiente Kappa	[31]
Google Earth	Landsat 8	-----	[17]
	Landsat ETM+	Datos in situ	[19]
Google Earth Engine	Landsat 5 TM y 7 TM	Prueba de ANOSIM y Mann-Whitney	[25]
ILWIS 3.3	Landsat 5TM	-----	[53]
MapInfo	-----	Drifters	[23]
QGIS	Sentinel-1 Google Earth	Comparación con base de datos de tráfico marino	[11]
QGIS 2.6	-----	Análisis de correlación de Spearman	[54]
Sentinel Application Platform (SNAP)	Landsat 8, Sentinel 1B, 2A y NPP sensor OLI	Datos In situ	[27]
	Sentinel-1	-----	[16]
	Sentinel -1 y Google earth	Comparación con base de datos de tráfico marítimo	[11]
	Sentinel 1 SAR	Casos	[8]
SIGTIERRAS	-----	Matriz de Confusión Datos in situ	[25]

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Lo anteriormente mostrado (Fig. 2) muestra los 52 artículos considerados en esta revisión, aplicando los respectivos criterios de selección y la metodología, con las investigaciones consideradas en esta revisión se realizaron las siguientes tablas (Tabla II, Tabla III). Solo se consideraron las investigaciones de aspecto científico, las revisiones sistemáticas (Tabla 1) apoyaron con otros atributos, tales como la utilidad de sensores remotos y la variada obtención de información, los análisis de derrames en ambientes terrestres y la escasez de respuesta ante estos accidentes especialmente en alta mar [55,56,57].

Las investigaciones obtenidas fueron de revistas Indexadas, tales como Science Direct, Proquest MDPI IOPSCIENCE y por último Scielo. Asimismo, de las revistas Scopus, Redalyc, Repositorios Universitarios, entre otros, pero se obtuvieron escasos estudios. Aun así, se resalta la importancia de adquirir la literatura de estas bases de datos pues estas permiten la presentación de publicaciones transparentes, completas y precisas [10].

Gracias a ello, en la Tabla II se identificaron que los territorios con mayor incidencia y sensibilidad son las zonas marinas, costeras (playas y bahías), zonas tropicales y distritos que tengan alta presencia de plataformas petroleras, lo que concuerda con [21] que aplicando el método IPIECA determinó dentro del rango de Sensibilidad “Alto/Muy Alta” y “Moderado” a espacios costeros y de alta mar. E igualmente los márgenes de los ríos y derivados, de acuerdo a la referencia [36] el petróleo ingresa a las capas internas del sustrato y al empeorar el daño, su limpieza se vuelve más complicada.

La expansión del hidrocarburo es un indicador importante para su medida de respuesta, lo obtenido en los mapeos en tiempo real de la referencia [11] determinó que en la mayoría de casos los derrames tienen una forma longitudinal. A través de la modelación digital en suelos homogéneos, la referencia [41] señaló que la extensión del petróleo es acorde a la ley de Darcy.

Debido a que en la mayoría de zonas presenta variada relieve terrestre, en la referencia [58] los señala como un riesgo significativo, en respuesta a ello, propone la aplicación de modelos de Evaluación del Riesgos de Derrames de Petróleo (OSRA) y las Redes Bayesianas (BN) (OSRA-BN), ya que cubren las incertidumbres relacionadas con la ocurrencia de derrames de petróleo y su magnitud.

Igualmente, es necesario aplicar exigencias legales ante una contaminación del territorio, sin embargo, existe una carencia de planes de respuesta. Especialmente en el Perú, al no contar con mecanismos legales severos y carecer de mapas de sensibilidad [59].

Por lo que, se incrementa la posibilidad de que los derrames de petróleo sucedan. En este estudio se determinó que las causas más significativas son la colisión de barcos por una inadecuada supervisión y ruptura de tuberías debido a su antigüedad. Además, de acuerdo a la referencia [33] resalta que un 47% de los accidentes ocurre por fallas humanas en la

práctica operativa. De ideal manera se recalca que los derrames pueden ocurrir por fenómenos naturales, como el oleaje.

Para proceder a la aplicación de SIG, primero se debe considerar la escala espacial de los satélites, conforme la referencia [60] si esta es de 6 metros la precisión aumenta a 97,32%. Si la zona de contaminación es pequeña preferentemente usar un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) [57]. Asimismo, se señala que los satélites para la obtención de imágenes, en su mayoría fueron Landsat y Sentinel. De los cuales, quién tuvo un reconocimiento distintivo fue Landsat 8 debido al sensor OLI, pues tiene una mayor definición de cobertura [61].

Continuando, el uso de SIG conforme a la referencia [62], lo refiere como una herramienta eficiente gracias al uso de patrones de ocurrencia e identificación de zonas vulnerables. Inclusive algunas investigaciones optaron por complementarlo con modelación matemática. Los softwares más representativos fueron ArcGIS, ENVI, Google Earth, SNAP y QGIS. Aun así, la referencia [55] enfatiza la validación en campo, especialmente por las condiciones dinámicas del mar [16].

Cabe mencionar que las investigaciones [52] y [25] optaron por usar recursos nacionales, pues sus plataformas desarrollaron con mayor precisión las características territoriales.

A pesar de las complicaciones, este artículo permite conocer los casos del petróleo en distintos continentes, así como las herramientas informáticas aplicadas. Por lo que, en favor de las futuras investigaciones, este artículo representa una fuente de información valiosa.

V. CONCLUSIONES

La investigación concluye que los ambientes más sensibles son los medios acuáticos, tales como ríos, zonas costeras, zonas de mar adentro, tropicales, provocando mayores posibilidades de dispersión de los contaminantes y disminuyendo la actividad fotosintética del medio.

Igualmente, se concluye que la aplicación del SIG resulta ser una gran ventaja, especialmente ArcGIS, pues 38,5 % de los artículos lo uso para analizar los derrames de petróleo o como complemento de la modelación. A pesar de su eficiencia, es necesaria una validación de datos, ya sea en campo o análisis estadísticos.

AGRADECIMIENTO

A quienes me guiaron en la realización de este documento, gracias por el apoyo, las críticas constructivas y su tiempo.

REFERENCIAS

- [1] Parra, F., Manrique, H., & Martínez, V. (2019). Derrames de petróleo y afectación a la salud materno infantil en pueblos indígenas de la Amazonía peruana: un análisis exploratorio desde los determinantes de la salud. Consorcio de Investigación Económica y Social (CIES) 59, Disponible en: <https://cies.org.pe/es/investigaciones/desarrollo-rural-medio-ambiente-recursos-naturales-y-energia-salud/derrames-de>
- [2] Pulido, V., Cruz, J., Arana, C., & Olivera, E. (2022). Daño ambiental en el litoral marino peruano causado por el derrame de petróleo (enero 2022) en la refinería La Pampilla. Manglar, 19 (1), doi: <http://doi.org/10.17268/manglar.2022.009>
- [3] López, M. (2017, 2 de octubre). Víctimas del petróleo en Perú: El derrame que contaminó a indígenas en Cuninico. SPDA Actualidad Ambiental. Disponible en: <https://www.actualidadambiental.pe/victimas-del-petroleo-en-peru-la-contaminacion-que-afecto-los-indigenas-de-cuninico/>
- [4] Palacios, J.; Chota, W.; Zárate, R. & Perez, P. (2019) Análisis Espacial de la Deforestación por actividad petrolera en el Lote 192, Loreto, Perú. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, 28 (2), 147-160, doi: <https://doi.org/10.24841/fa.v28i2.501>
- [5] Bentancourt, F., Palacio, A., Rodríguez, A., & Silva, R. (2009). Determinación numérica del área de derrames de petróleo en cuerpos de agua. ResearchGate, 24 (2) p 5-12. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/323430157_Determinacion_numerica_del_area_de_derrame_de_petroleo_en_cuerpos_de_agua
- [6] Santos, L., Cunha, M., Shaeffer, Y., & Cintrón, G. (2012). Long-term effects of oil pollution in mangrove forests (Baixada Santista, Southeast Brazil) detected using a GIS-based multi-temporal analysis of aerial photographs [Efectos a largo plazo de la contaminación por petróleo en los bosques de manglares (Baixada Santista, Sudeste de Brasil) detectados mediante un análisis multitemporal basado en SIG de fotografías aéreas]. Brazilian Journal of Oceanography, 60(2), 159-170. Disponible en: <https://www.scielo.br/bjoc/a/P7gh7d3wjSZ5LSGtFtsxR5v/?lang=en>
- [7] Abou, I.; Zakzouk, M.; Abdulaziz, A. & Ali, E. (2020) The Potentiality of Operational Mapping of Oil Pollution in the Mediterranean Sea near the Entrance of the Suez Canal Using Sentinel-1 SAR Data [La potencialidad del mapeo operativo de la contaminación por hidrocarburos en el mar Mediterráneo cerca de la entrada del Canal de Suez utilizando datos Sentinel-1 SAR]. Remote Sensing, 12(8), 1352, doi: <https://doi.org/10.3390/rs12081352>
- [8] Lei, H., Ning, J., Dong, S., & Liu, Y. (2012). Oil spill forecast model based on uncertainty analysis: A case study of Dalian [Modelo de pronóstico de derrames de petróleo basado en análisis de incertidumbre: un estudio de caso de Dalian] Ocean Engineering, 54, 206-2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.07.019>
- [9] Chacaltana, J., Dos, R., Chacaltana, T., & Coelho, E. (2014). Mapeamento de áreas de sensibilidade ambiental ao derrame de óleo na baía de Vitória, Espírito Santo-Brasil [Mapeo de áreas de sensibilidad ambiental al derrame de petróleo en la bahía de Vitória, Espírito Santo-Brasil]. Revista Geográfica Venezolana, 55(2), 195-212. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347733745002>
- [10] Page, M., McKenzie, J., Bossuyt, P., Boutron I., Hoffmann T., Mulrow C., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E., Brennan, S., Chou, R., Glanville, J. & Grimshaw, J. (2021) The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. PLoS Med 18(3): e1003583, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003583>
- [11] El Magd, I.; Zakzouk, M.; Ali, E. & Abdulaziz, A. (2021) An Open Source Approach for Near-Real Time Mapping of Oil Spills along the Mediterranean Coast of Egypt [Un enfoque de código abierto para el mapeo en tiempo casi real de derrames de petróleo a lo largo de la costa mediterránea de Egipto]. Remote Sensing, 13 (14), 2733, doi: <https://doi.org/10.3390/rs13142733>
- [12] Enuneku A., Anani O., Job O., Kubeyinje B., Ogbomida E., Asemota C., Okpara B., Imoobec T., Ezemonye, L., Oluwaseun, A., Hefft, D. (2021) Mapping soil susceptibility to crude oil pollution in the region of Delta, South-South Nigeria: A proportional study of environmental, health, ecological risks, and geospatial evaluation [Mapeo de la susceptibilidad del suelo a la contaminación por petróleo crudo en la región del Delta, sur-sur de Nigeria: un estudio proporcional de medioambientales, salud, riesgos ecológicos y evaluación geoespacial]. Scientific African, Volume 14, e01012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01012>
- [13] Li, H., Li, Y., Li, C., Li, W., Wang, G. & Zhang, S. (2017) Bohai and Yellow Sea Oil Spill Prediction System and Its Application to Huangdao '11.22' Oil Spill Incident [Sistema de predicción de derrames de petróleo de Bohai y el Mar Amarillo y su aplicación al incidente del derrame de petróleo '11.22' de Huangdao] IOP Publishing, 81, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012054>

- [14] Liu, Y., Zhang, Y., Long, Y. & Wang, L. (2020) Risk Assessment of Sudden Water Pollution Accidents Based on the One-Dimensional Hydrodynamic Model for Weihe River Basin, China [Evaluación de riesgos de accidentes de contaminación súbita del agua basada en el modelo hidrodinámico unidimensional para la cuenca del río Weihe, China] IOP Publishing, 555, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/555/1/012065>
- [15] Raja, P., Karthikeyan, P., Shambanagouda, M., Krishna, S. Mallavarapu, Murthy (2022) Spatial distribution of total petroleum hydrocarbons in surface sediments of Palk Bay, Tamil Nadu, India [Distribución espacial de hidrocarburos de petróleo totales en sedimentos superficiales de Palk Bay, Tamil Nadu, India] Environmental Chemistry and Ecotoxicology, 4, 20-28, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneeco.2021.10.002>
- [16] Sari, D., Mukhtasor, Zikrā, M. (2021) Mapping Oil Spill Using Sentinel-1: Study Case of Karawang Oil Spill [Mapeo de derrames de petróleo usando Sentinel-1: caso de estudio del derrame de petróleo de Karawang] IOP Publishing, 698 (1), doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/698/1/012019>
- [17] Nurfitri, S.; Raihan, M.; Putri, M.-R.; Setiawan, A.; Gade, M. & Pohlmann, T. (2018) Environmental assessment of Pari Island towards oil spill using Geographic Information System (GIS): a preliminary study [Evaluación ambiental de la isla de Pari frente al derrame de petróleo utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG): un estudio preliminar] IOP Publishing, 162. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/162/1/012008>
- [18] Rustandi, Y., Damar, A., Rakasiwi, G., Afandy, A., Hamdani, A. & Mulyana, D. (2020) Environmental sensitivity index mapping as a prevention strategy against oil spill pollution: A case study on the coastal area of South Sumatera Province in Indonesia [Mapeo del índice de sensibilidad ambiental como estrategia de prevención contra la contaminación por derrames de petróleo: un estudio de caso en el área costera de la provincia de Sumatra del Sur en Indonesia]. IOP Publishing, 414, Iss. 1, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/414/1/012019>
- [19] Hernawan, U. & Rahayu, K. (2020) Oil spill contingency plan (OSCP) by environmental sensitivity index (ESI) analysis at East Barito District, South Barito District and Kapuas District (Tamiang Layang, Buntok and surrounding area), Central Kalimantan Province [Oil spill contingency plan (OSCP) by environmental sensitivity index (ESI) analysis at East Barito District, South Barito District and Kapuas District (Tamiang Layang, Buntok and surrounding area), Central Kalimantan Province] IOP Publishing, 500, Iss. 1, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/500/1/012026>
- [20] Jiang, P., Tong, S., Wang, Y. (2021) Establishment and application of oil spill model in inland waterway [Establecimiento y aplicación del modelo de derrame de hidrocarburos en vías navegables interiores] IOP Publishing, 643, Iss. 1, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/643/1/012126>
- [21] Rustandi, Y., Damar, A., Fahrudin, A., Rakasiwi, G., Affandy, A., Hamdani, A., Mulyana, D. & Kamsari (2020) An approach to environmental sensitivity index study at coastal area toward oil spill accident: A case study on the northern and southern coast of Madura Island [Una aproximación al estudio del índice de sensibilidad ambiental en la zona costera hacia el accidente por derrame de petróleo: un estudio de caso en la costa norte y sur de la isla Madura] IOP Publishing, 420, Iss.1, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/420/1/012028>
- [22] Marrero, M.; Petersson, M. & Monzón, Y. (2020) Valoración económica de daños ambientales por derrame de hidrocarburo Ciencias Holguín, 26(3), 52-66. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1815/181563834005/>
- [23] Calzada, A., Pérez, F., Reyes, D. & Casals, R. (2018) Modelación de los derrames de petróleo mediante el empleo de PETROMAR. Revista Cubana de Meteorología, 21(2), 57-69. [En línea] Disponible en: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/413>
- [24] González, C., Filonov, A., Mireles, O. & Tereshchenko, I. (2019) Análisis espectral y dispersión superficial de detritos suspendidos en la Bahía de Banderas mediante imágenes de satélite. Revista Cartográfica, (98), 223-237, doi: <https://doi.org/10.35424/rcarto.i98.148>
- [25] Palacios, J.; Chota, W.; Zárate, R. & Perez, P. (2019) Análisis Espacial de la Deforestación por actividad petrolera en el Lote 192, Loreto, Perú. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana, 28 (2), 147-160, doi: <https://doi.org/10.24841/fa.v28i2.501>
- [26] Rosales, J. & Apaza, H., (2022) Análisis de imágenes satelitales Landsat 8 por componentes principales y MNF para la detección de zonas del derrame de petróleo Repsol en la Costa Peruana. Revista Científica TecnoHumanismo, 2(1), 172–189, doi: <https://doi.org/10.53673/th.v2i2.110>
- [27] Velaochaga, G. & Xu, H. (2019). Detección de posible derrame de petróleo en el mar peruano frente a Takra usando imágenes satelitales, febrero 2017. Boletín Instituto del Mar del Perú, 34(1), 265–276. [En línea] Disponible en: <https://revistas.imarpe.gob.pe/index.php/boletin/article/view/23>
- [28] Yaulema, F. (2017). Modelación de riesgos ambientales ocasionados por el derrame de combustibles suscitado en el Poliducto Esmeraldas-Santo Domingo en el PK – 128 de “Epetroecuador”. Revista Del Instituto De Investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas, 20(39), 83–92, doi: <https://doi.org/10.15381/igeco.v20i39.14170>
- [29] Caja, A., Iannacone, J., (2021) Evaluación del riesgo ambiental por petróleo crudo en las especies acuáticas Lemna minor, Daphnia magna y Danio rerio. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 45 (176), 777–794, doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1398>
- [30] Pinheiro, A. & Carvalho, A. (2021) Análise da sensibilidade ambiental do litoral de Paraty (Estado do Rio Janeiro, Brasil) a potenciais derramamentos de óleo [Análisis de la sensibilidad ambiental de la costa de Paraty (Estado de Río de Janeiro, Brasil) ante posibles derrames de petróleo] Revista Geográfica de América Central, (66), 133-164, doi: <https://doi.org/10.15359/rgac.66-1.6>
- [31] Buitrago, W. & Medina, J. (2021) Análisis Multitemporal Mediante Árboles de Decisión de un Derrame de Crudo y su Impacto Ambiental en la Zona de Cubará Boyaca - Colombia. Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação, 516-527. [En línea]. Disponible en: <https://www.ProQuest.com/openview/8c5b9c92b4525a0f2f375d3d6b1dd174/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1006393>
- [32] Daza, O., Vera, E., & Chías, L. (2020). Evaluación cartográfica de la vulnerabilidad frente a derrames de hidrocarburos en ductos. Consecuencias ambientales y sociales. Investigaciones Geográficas, (101), doi: <https://doi.org/10.14350/ig.59851>
- [33] Mayorga, H. & Reyes, F. (2022) Análisis de Derrames de Petróleo en el Campo Ancón Mediante Sistemas de Información Geográfica. Revista Politécnica, 49(1), 53–60, doi: <https://doi.org/10.33333/rp.vol49n1.05>
- [34] Mayorga, H. & Rivera, J. (2018). Environmental Risks for Oil Spills in Northeastern Ecuador using GIS: Response Times and Vulnerable Areas [Riesgos Ambientales por Derrames de Petróleo en el Noreste de Ecuador usando SIG: Tiempos de Respuesta y Áreas Vulnerables]. Revista Politécnica, 41(2), 7-14. [En línea] Disponible en: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292018000300007&lng=es&tling=en
- [35] Durán, R., Romeo, L., Whiting, J., Vielma, J., Rosa, K., Bunn, A., & Bauer, J. (2018) Simulation of the 2003 Foss Barge - Point Wells Oil Spill: A Comparison between BLOM and GNOME Oil Spill Models [Simulación de la barcaza Foss de 2003: derrame de petróleo de Point Wells: una comparación entre los modelos de derrame de petróleo de BLOM y GNOME]. Journal of Marine Science and Engineering, 10 (5), 626, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/jmse6030104>
- [36] Löw, F., Stieglitz, K., Diemar, O. (2021) Terrestrial oil spill mapping using satellite earth observation and machine learning: A case study in South Sudan [Mapeo de derrames de petróleo terrestres utilizando observación terrestre satelital y aprendizaje automático: un estudio de caso en Sudán del Sur]. Journal of Environmental Management, 298, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113424>
- [37] Cagnazzo, C.; Potente, E.; Regnaud, H.; Rosato, S. & Mastronuzzi, G. (2021) UAV/UGV System for meso-macro pollutants identification in the beach environment [Sistema UAV/UGV para la identificación de meso-macro contaminantes en el entorno de la playa]. Rendiconti Online Società Geologica Italiana 55, 29 – 35, doi: <https://doi.org/10.3301/ROL.2021.12>
- [38] Guandalini, R.; Agate, G. & Moia, F. (2017) Modelado numérico 3D de la dispersión de hidrocarburos en el mar debido a diferentes escenarios de accidentes [Modelado numérico 3D de la dispersión de hidrocarburos en el mar debido a diferentes escenarios de accidentes]. Energy Procedia, 125, 161-169, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.165>

- [39] Lu, J., Yuan, F., Mikkelsen, J.-D., Ohm, C., Stange, E., Holand, M. (2017) Modelling the transport of oil after a proposed oil spill accident in Barents Sea and its environmental impact on Alke species [Modelado del transporte de petróleo después de un accidente de derrame de petróleo propuesto en el Mar de Barents y su impacto ambiental en las especies de Alke]. IOP Publishing, 82, Iss. 1, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/82/1/012010>
- [40] Tikhonova, S., Kapitonova, T., Struchkova, G. (2019) Safety assessment of oil and gas pipelines using satellite information [Evaluación de seguridad de oleoductos y gasoductos utilizando información satelital]. Procedia Structural Integrity, 20, 230-235, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.144>
- [41] Dorrer, G. & Yarovoy, S. (2021) Digital model of the oil spill process on the Earth's surface [Modelo digital del proceso de derrame de petróleo en la superficie terrestre] IOP Publishing, 2094, doi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2094/5/052022>
- [42] Condori, I., Loza, M., Mamani, F., & Solíz, H. (2018). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Camanavi en los años 1989 - 2014. Journal of the Selva Andina Research Society, 9(1), 25-44. [En línea]. Disponible en : http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942018000100003&lng=es&tlng=es
- [43] Pan, H. & Khabazi, M. (2020). Study on the Evolution Monitoring of Topographic and Hydrological Characteristics of Small Watershed Based on Remote Sensing and GIS [Estudio sobre el Monitoreo de la Evolución de las Características Topográficas e Hidrológicas de Pequeñas Cuenas Basadas en Teledetección y SIG]. Earth Sciences Research Journal, 24(3), 297-303, doi: <https://doi.org/10.15446/esrj.v24n3.90340>
- [44] Nhamo, L., Magidi, J., & Dickens, C. (2017). Determining wetland spatial extent and seasonal variations of the inundated area using multispectral remote sensing [Determinación de la extensión espacial de los humedales y las variaciones estacionales del área inundada mediante sensores remotos multispectrales]. Water SA, 43(4), 543-552, doi: <https://dx.doi.org/10.4314/wsa.v43i4.02>
- [45] Jagadeesh, B., Krishna K. (2021) Flood Plain Modelling of Krishna Lower Basin Using Arcgis, Hec-Georas And Hec-Ras [Modelado de planicies de inundación de la cuenca inferior de Krishna usando Arcgis, Hec-Georas y Hec-Ras] IOP Publishing, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1112/1/012024>
- [46] Baghal, F., Akbar, A., Hadi, M., Yousefi, M. (2018) Data on assessment of groundwater quality with application of ArcGIS in Zanjan, Iran [Datos sobre la evaluación de la calidad del agua subterránea con la aplicación de ArcGIS en Zanjan, Irán] Data In Brief 18, 375-379, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.03.059>
- [47] Jianghong, M., Xinling, T., & Wei, S. (2021). Tracing the source of heavy metal pollution in water sources of tourist attractions based on GIS remote sensing [Trazabilidad de la contaminación por metales pesados en fuentes de agua de atracciones turísticas a través del Sistema de Información Geográfica] Earth Sciences Research Journal, 25(2), 207-214, doi: <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n2.84631>
- [48] Lu, J., Yuan, F., Mikkelsen, J.-D., Ohm, C., Stange, E., Holand, M. (2017) Modelling the transport of oil after a proposed oil spill accident in Barents Sea and its environmental impact on Alke species [Modelado del transporte de petróleo después de un accidente de derrame de petróleo propuesto en el Mar de Barents y su impacto ambiental en las especies de Alke]. IOP Publishing, 82, Iss. 1, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/82/1/012010>
- [49] Hernández, R., Martínez, L., Peñuela, L., & Rivera, S. (2020). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio. Investigaciones geográficas, (101), doi: <https://doi.org/10.14350/ig.59892>
- [50] Flores, N., Castro, I., & Aponte, H. (2020). Evaluación de las unidades de vegetación en Los Pantanos de Villa (Lima, Perú) mediante sistemas de información geográfica y teledetección. Arnaldoa, 27(1), 303-321, doi: <https://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.271.27119>
- [51] Ortiz, A., Fuentes, J.-J. (2020) Estimación del impacto potencial de la contaminación difusa por métodos simplificados en el Área de Protección de Flora y Fauna, Pico de Tancitaro, Michoacán, México. Revista Geográfica de América Central, 2, núm. 65, doi: <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.8>
- [52] Giraldo, R. (2021) Análisis de aplicaciones espectrales derivados de imágenes satelitales PerúSAT-1. Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas, 24(47), 75-81, doi: <https://doi.org/10.15381/revista.v24i47.20653>
- [53] Lao, B., & Peláez, D. (2018). La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica para el manejo de las tierras. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 27(1), 54-65 [En línea] Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542018000100006&lng=es&tlng=es
- [54] Navarro, A., Araya, F., Moreira, C., & Ruiz, K. (2017). Uso de sistemas de información geográfica para determinar pérdida de bosque y suelo de las nacientes administradas por acueductos rurales de la Zona Huetar Norte, Costa Rica. Revista Tecnología en Marcha, 30(2), 75-86, doi: <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v30i2.3199>
- [55] Grote, M.; van Bemem, C.; Böhme B., Callies U.; Calvez, I., Christie, B., Colcomb, K., Damian, H.-P., Farke, H., Gräbsch, C., Hunt, A., Höfer, T., Knaack, J., Kraus, U., Le Floch, S., Le Lann, G., Leuchs, H., Nagel, A., Nies, H., Nordhausen, W., Rauterberg, J., Reichenbach, D., Scheiffarth, G., Schwichtenberg, F., Theobald, N., Voß, J.,...Wahrendorf, D.-S. (2017) The potential for dispersant use as a maritime oil spill response measure in German waters [El potencial del uso de dispersantes como medida de respuesta a derrames marítimos de petróleo en aguas alemanas]. Marine Pollution, 129(2), 623-632, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.050>
- [56] Ogbuka, J., Nwanmuoh, E., Ogbo, A. & Achoru, F. (2022) Offshore oil spill response base and management of deepwater/offshore oil resources in the Nigerian marine waters: a review [Base de respuesta a derrames de petróleo en alta mar y gestión de recursos de petróleo en aguas profundas/en alta mar en las aguas marinas de Nigeria: una revisión]. International Journal of Environmental Impacts, 5, 65-81, doi: <http://dx.doi.org/10.2495/EI-V5-N1-65-81>
- [57] Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. Idesia (Arica), 38(4), 99-107, doi: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099>
- [58] Parviainen T., Goerlandt F., Helle I., Haapasaari P. & Kuikka S. (2021) Implementing Bayesian networks for ISO 31000:2018-based maritime oil spill risk management: State-of-art, implementation benefits and challenges, and future research directions [Implementación de redes bayesianas para la gestión de riesgos de derrames marítimos de petróleo basada en ISO 31000: 2018: estado del arte, beneficios y desafíos de implementación, y futuras direcciones de investigación]. Journal of Environmental Management, 278, art. no. 111520, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111520>
- [59] Ramírez, A. (2021). Análisis de los derrames de hidrocarburos procedente de buques y su gestión en el Perú. Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas, 24(48), 143-151, doi: <https://doi.org/10.15381/igee.v24i48.21770>
- [60] Zhang, Y. (2020) Sensitivity analysis in simulating oil slick using CA model [Análisis de sensibilidad en la simulación de una marea negra utilizando el modelo CA]. Ocean Engineering, 218, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108216>
- [61] Picone, N. (2017, octubre) Comparación de imágenes satelitales Sentinel 2 y Landsat 8 en el estudio de áreas urbanas. ResearchGate. [En línea]: Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/320705706_COMPARACION_DE_IMAGENES_SATELITALES_SENTINEL_2_Y_LANDSAT_8_EN_EL_ESTUDIO_DE_AREAS_URBANAS/citations
- [62] Santiago, E. & Rivera, L. (2018) Environmental Risks for Oil Spills in Northeastern Ecuador using GIS: Response Times and Vulnerable Areas [Riesgos Ambientales por Derrames de Petróleo en el Noreste de Ecuador usando SIG: Tiempos de Respuesta y Áreas Vulnerables] Revista Politécnica, 41(2), 7-14, [En línea] Disponible en: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292018000300007&lng=es&tlng=en