

ANÁLISIS HISTORICO DEL FRACTURAMIENTO HIDRAULICO Y SU DESARROLLO EN YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES

HISTORICAL ANALYSIS OF HYDRAULIC FRACTURING AND ITS DEVELOPMENT IN UNCONVENTIONAL RESERVOIRS

Monica Maria Beranuy Clavijo¹, Esteban Pardo Restrepo², Alejandro Alzate Buitrago³,

Resumen

El fracturamiento hidráulico es una actividad de tratamiento petrolero que surge para facilitar o incrementar el flujo de hidrocarburos en los yacimientos no convencionales de baja permeabilidad. Su propósito principal, es crear canales de flujo desde la formación al pozo para mejorar la productividad de los mismo. Por ser una actividad de origen humano, cuyo propósito fundamental es optimizar la recuperación y extracción de hidrocarburos, es importante conocer las actuales tendencias, problemas asociados y protocolos ambientales establecidos que permitan tener mayor conocimiento sobre dicho tema. El presente artículo de investigación tiene como objetivo evidenciar, de manera general, la importancia de la revisión de la producción científica e investigaciones adelantadas sobre el tema, de tal manera que se puedan conocer los aportes que han hecho diferentes autores y organizaciones a nivel mundial y así contar con información disponible, confiable y de pertinencia, que permita análisis y reflexiones más objetivas acerca de un tema tan debatido, controversial y de tan altos impactos como lo es la explotación de yacimientos no convencionales. Para tales efectos, se adelantó una búsqueda de información científica, haciendo uso de la base de datos SCOPUS, utilizando la ecuación de búsqueda “*hydraulic fracturing*”, la que permitió consultar y tratar estadísticamente 2000 artículos, a través de la herramienta de código abierto *Bibliometrix*, evaluando la producción científica por países, las fuentes con mayor número de publicaciones, los autores más relevantes, los documentos más citados, afiliaciones con más publicaciones y las redes de colaboración entre países y autores mediante el software Vosviewer. Se destaca que China, Estados Unidos y Canadá son los países con mayor productividad científica y que el artículo “Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO₂” ha sido el más citado el cual se destaca por sus aportes ambientales y temas de producción, publicado por el autor estadounidense Richard S.Middleton. Del mismo modo, los ingenieros Abousleiman y Adachi Ji han sido los autores con mayor impacto a nivel mundial sobre el fracturamiento hidráulico.

Palabras Clave: Fracturamiento hydraulic, Hidrocarburos, Medio ambiente, Pozos, Reservorio.

¹ Estudiante del Programa de Ing. civil, Universidad Libre Seccional Pereira. monicam-beranuy@unilibre.edu.co

² Estudiante del Programa de Ing. civil, Universidad Libre Seccional Pereira. esteban-pardor@unilibre.edu.co

³ Docente del Programa de Ing. civil, Universidad Libre Seccional Pereira. alejandro.alzateb@unilibre.edu.co

Abstract

Hydraulic fracturing is an oil treatment activity that arises to facilitate or increase the flow of hydrocarbons in unconventional deposits of low permeability. Its main purpose is to create flow channels from the formation to the well to improve its productivity. As it is an activity of human origin, whose fundamental purpose is to optimize the recovery and extraction of hydrocarbons, it is important to know the current trends, associated problems and established environmental protocols that allow greater knowledge on this subject. This research article aims to demonstrate, in a general way, the importance of the review of scientific production and research carried out on the subject, in such a way that the contributions made by different authors and organizations worldwide can be known and thus have available information, reliable and relevant, which allows analysis and more objective reflections on a topic as debated, controversial and of such high impacts as the exploitation of unconventional deposits. For this purpose, a search for scientific information was carried out, making use of the SCOPUS database, using the search equation "hydraulic fracturing", which allowed to consult and statistically treat 2000 articles, through the open source tool Bibliometrix, evaluating the scientific production by countries, the sources with the highest number of publications, the most relevant authors, the most cited documents, affiliations with more publications and the collaboration networks between countries and authors using vosviewer software. It is highlighted that China, the United States and Canada are the countries with the highest scientific productivity and that the article "Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO₂" has been the most cited which stands out for its environmental contributions and production themes, published by the American author Richard S. Middleton. Similarly, engineers Abousleiman and Adachi Ji have been the authors with the greatest impact worldwide on hydraulic fracturing.

Keywords: Hydraulic fracturing, Hydrocarbons, Environment, Wells, Reservoir.

1. Introducción.

Una de las actividades que más ha impactado y se ha ejecutado en a nivel mundial a causa de la escasez en el hallazgo de nuevas fuentes no convencionales de hidrocarburos, es la fracturación hidráulica (Jiménez 2021), que es una actividad que se ha empleado con éxito para la extracción de petróleo y gas en yacimientos no convencionales (Jia et al., 2020), la cual demanda una gran cantidad de insumos, que deben ser provistos por las industrias locales de bienes y servicios.

Li et al., (2021) la menciona como un “enfoque importante para estimular la producción de depósitos de petróleo de permeabilidad ultrajaba” (p3). y Rueda et al., (2020) la agrega como “una técnica en la que se bombea fluido presurizado a un pozo para inducir la propagación de la fractura en la formación rocosa la cual tiene como objetivo mejorar la permeabilidad y la conectividad del pozo con el reservorio” (p3), donde su objetivo y beneficio final es lograr mejorar el paso del hidrocarburo líquido y gaseoso hacia la superficie (Valderrama & Idrovo, 2019).

Por ende, al ser una actividad que relaciona diferentes ambientes sociales y ambientales de una región (Montenegro 2020), es importante conocer las diferentes investigaciones y nuevos procesos que han permitido la evolución de esta actividad a nivel mundial, Saber el comportamiento y la frecuencia de la información que es publicada y darles un valor significativo a esta es uno de los objetivos más importantes para tener grandes avances en futuros proyectos ingenieriles, por lo tanto, a través de la bibliometría se pretende utilizar una combinación de varias fuentes de datos y técnicas de análisis que buscan proporcionar un mejor estado del arte para el desarrollo de esta actividad (Melcher et al., 2020).

El fracturamiento hidráulico es un tema importante en las ciencias afines a la estructura de la ingeniería minera y petrolera (Li et al., 2012) , que conlleva a un impacto en diferentes ámbitos económicos, sociales y productivos, sin embargo, debido a las limitaciones de los programas de exploración, ausencia de nuevos hallazgos importantes y disminución de las reservas, se evidencia un gran impacto ambiental (Suarez., et al 2008), desarrollando grandes emisiones de metano interviniendo negativamente la atmosfera, provocando no sólo el aceleramiento de la crisis climática, sino que además, traería consecuencias ambientales preocupantes de los gases invernadero provocando cambios irreversibles (Benavides & León 2017)

A pesar de que” El fracking” es una fuente que permite incrementar las reservas energéticas y por consecuente asegurar sostenibilidad y promover el desarrollo social y económico para el ser humano (Charry, 2017), se deben minimizar muchas externalidades sobre el medio ambiente y consecuentemente sobre el bienestar de la población humana (Suarez 2023), abordando temas de carácter ambiental, económico, social y político (Rodríguez, 2021), Donde se establece que una solución prematura para mejorar este tipo de actividades petroleras debe de ser algo inevitable, una de ellas fue implementar la obtención de hidrocarburos en yacimientos no convencionales, rocas sedimentarias (en general lutitas) de naturaleza fracturada, lo cual se permite obtener gas de forma natural (Heinberg 2014).

Esta técnica está directamente relacionada con el uso del suelo y sus condiciones geológicas, alterando el medio ambiente, donde uno de los primeros inconvenientes que se tiene frente a esta actividad es la propagación de fracturas hidráulicas, ya que son difíciles de predecir

debido a las dinámicas naturales, por ende Shi et al., (2021) menciona que “este proceso puede conducir a cambios incontrolables en las condiciones hidrogeológicas” (p.3). Por lo tanto, la predicción y el control de la propagación de la fractura son fundamentales para el aumento de la permeabilidad en el yacimiento que contiene minerales. Yuan et al., (2020) aportan un método frente a esta actividad, y asumen que “la permeabilidad de un reservorio geotérmico fracturado mejora con los efectos combinados del enfriamiento inducido por la inyección y el aumento de la presión del fluido” (p.4).

Teniendo en cuenta que las aplicaciones de campo de todos los resultados sobre el fracturamiento hidráulico en pozos no convencionales deben ser discutidos gracias a los grandes volúmenes de agua que se usan (U.S. EPA, 2016), al ser procesos naturales generan grandes variables o condiciones que son difíciles de predecir, afectando paulatinamente diferentes aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de realizar dicha actividad, algunos de ellos son, la velocidad de flujo de inyección en un sistema de fracturamiento triaxial con un sistema calentado a alta temperatura (Cheng et al., 2020), las presiones de ruptura que aumentan el caudal de inyección y las tensiones de confinamiento, (Wang, et al., 2020), las fracturas en red con diferentes longitudes y anchos. (Li et al., 2020) y la nocividad futura de aditivos químicos inyectados más comúnmente en los yacimientos no convencionales (Medlin, 1979). Gracias a todos los impactos que se han visto a medida que avanza este tipo de actividad se le da importancia a diferentes modelos que permiten tener una mayor eficiencia haciendo su implementación más atractiva en herramientas de ingeniería modernas (Chuprakov et al., 2014).

Del mismo modo, los hidrocarburos son compuestos que deben tener gran consideración y cuidado en su extracción ya que puede generar grandes impactos o problemas ambientales, por lo tanto, es importante establecer investigaciones y darles importancia a diferentes métodos experimentales y de observación, herramientas de modelado y pruebas de ensayo (Liu et al., 2013), y así mejorar todo tipo de técnicas. Los modelos permiten a futuras investigaciones utilizar métodos experimentales y de observación, herramientas de simulación y pruebas que conllevar a mitigar todo tipo de impactos ambientales (Liu et al., 2013). Uno de ellos es la topología de la discretización espacial que radica en la predicción de la propagación de fracturas hidráulicas en reservorios de lutitas compactas las cuales son rocas sedimentarias de baja permeabilidad (Solimán, 2012), este modelo permite asumir la dirección de la fractura, siendo de gran avance ya que el yacimiento a menudo contiene un gran número de fracturas preexistentes que influyen fuertemente en la dirección de propagación (Profit et al., 2016), menciona que otro de ellos es la simulación numérica basada en computadora que se puede utilizar como herramienta para el análisis de los tratamientos de fractura y la predicción del desempeño de un pozo posfracturable el cual soluciona problemas físicos que involucra la mecánica de la fractura, el flujo de fluidos y transferencia de calor tanto en la fractura como en el yacimiento (Settari & Price, 1984), La velocidad de bombeo y viscosidad de fluido de fractura el cual se puede utilizar para simular la propagación de redes de fracturamiento. (Z. Li et al., 2020). y por último modelados de ensayos que permiten deducir el dimensionamiento, ya que al disminuir la altura de una fractura puede aumentar el tamaño de la red de fracturas y el área de contacto entre el reservorio, donde estas técnicas potenciaron la producción de gas en yacimientos no convencionales a escala industrial. (Chuprakov, 2010)

Por lo tanto, se concluye que tener control sobre la propagación de grietas junto con el flujo

de fluidos en medios porosos es de gran importancia ya que tiene aplicaciones muy importantes en la extracción de hidrocarburos (R. Liu et al., 2020). Es importante conocer que el flujo de hidrocarburos tiene una posición muy importante a la hora del fracturamiento cuando se incrementa los volúmenes de drenaje del yacimiento puede generar gran apertura y repercusiones futuras dentro de la actividad, (Zangeneh et al., 2014), es decir, que el diagnóstico de fracturas es una tarea importante y desafiante en el diseño de optimización de fracturamiento.

Ge et al., (2020), describen en este sentido que una de características principales que debe tener un yacimiento convencional para poder ser fracturado es la alta presión de los fluidos sin consistencias de drenaje continuo, siendo un requerimiento principal para que el hidrocarburo fluya del yacimiento al pozo de baja permeabilidad al esfuerzo mínimo, puesto que existen tres tipos de esfuerzos principales, dos que son horizontales y uno vertical. De igual forma Jia et al., (2015), dice que evaluar rápidamente la efectividad del tratamiento de fracturamiento, predecir con precisión la producción de pozos horizontales y realizar tratamientos adecuados, especialmente en las primeras etapas de la vida útil del pozo, son una de las tareas más importantes ya que permite analizar los datos de flujo de retorno del fluido de fracturamiento monitoreados con frecuencia para caracterizar las redes de fracturas.

Del mismo modo Jia et al., (2015), aporta que un fluido inyectado en las fracturas inducidas artificiales que crecen continuamente mejora gracias a las propiedades y funciones que son realizadas en el laboratorio la cual permite mantener abierta la fractura como se mencionaba anteriormente y así garantizar que se puede culminar con éxito la operación. En relación con esto, Dusseault, (2011), dice que “el desarrollo de fluidos tiene un porcentaje alto en químicos que a medida del tiempo van generando contaminantes y esto ha generado un debate entre la sociedad misma, puesto que las consecuencias que presentan los químicos y gases para el medio ambiente y la comunidad en general son muy críticas”. (p.5), siendo el debate principal el Fracking que en su proceso contamina los acuíferos por el residuo de sus fluidos (Ocampo 2018).

Por ende, es importante que la industria a través de la investigación pueda identificar las mejores técnicas para el desarrollo de las actividades de los yacimientos no convencionales, ya que es importante tener diversas prácticas que no afecten la salud humana y el ambiente como riesgos de explosión, contaminación de acuíferos, generación de sequías en fuentes de agua, rupturas de las capas de suelo subterráneas, dificultades en las áreas de ganadería, agricultura y turismo, y por el contrario ser una actividad que genere los mayores beneficios en cuanto a la economía y sostenibilidad.

Al ser el fracturamiento hidráulico un tema ambientalmente crítico y a pesar de que se han tenido nuevas consideraciones y diferentes modelos, como se mencionó anteriormente, es importante evidenciar que en Colombia se viene utilizando el fracturamiento hidráulico desde hace varias décadas, siendo implementado en diferentes campos petroleros distribuidos a lo largo del país en cuencas geológicas como: El Piedemonte Llanero, Llanos, Valle Superior del Magdalena, Putumayo, Valle Medio del Magdalena, Catatumbo, Guajira entre otros (Unidad de Planeación Minero Energética, 2018), donde el número de pozos en que se ha usado la tecnología del fracturamiento hidráulico en Colombia puede llegar a un número cercano a los 400, y se han realizado más de 800 fracturas en los pozos intervenidos.

Finalmente, en un país donde el petróleo ha sido determinante en su modernización debido a las condiciones favorables de gran parte del subsuelo el cual le permite en un mediano y largo plazo gozar con tranquilidad de un autoabastecimiento de hidrocarburos y a su vez consolidarse como un gran exportador energético, beneficiándose así de la salida directa de hidrocarburos del país hacia otros lugares del mundo generando una economía y patrimonio duradero (Marín, 2015). Sin embargo, por esta razón también se ve afectado por la imparable demanda de bienes y servicios, lo que ha llevado a crear una dependencia de este país por los recursos naturales no renovables como el petróleo, los minerales, y el gas natural, esenciales en la producción de electricidad, transporte, manufacturas químicas y plásticas, entre otros, (vergel 2020)

2. Metodología

El día 3 de marzo del 2022 se da inicio a la investigación por medio de la base de datos Scopus para obtener los artículos relacionados con el tema del fracturamiento hidráulico, a partir del término “*hydraulic fracturing engineering*” y con los filtros; fin de publicación, artículos e ingeniería, se obtuvo como resultado 2000 documentos, registrando un periodo de producción desde el año 2004 hasta el 2022 los cuales fueron exportaron para hacer su respectivo estudio bibliométrico.

A partir de este estudio se utilizó diferentes herramientas que ayudaron a tener una mejor interpretación de los análisis y resultados de la búsqueda, uno de ellas fue *Bibliometrix* creada por los autores italianos (Massimo & Cuccurullo, 2016), lo cual permite tener información cuantificada de los temas tratados, para las relaciones y/o conexiones entre países, autores y palabras claves utilizadas en la investigación se utilizó Vos Viewer, siendo una herramienta de software para analizar y visualizar la literatura científica (Waltman, 2020), a su vez *Microsoft Power Bi* permitió tener una representación gráfica de los países tanto en el número de sus citas como en producción.

La tabla 1 muestra la contribución que se ha hecho a nivel mundial sobre el fracturamiento hidráulico, la cual evidencia que desde el año 2004 se comenzó a publicar información sobre dicho tema, abarcando hasta el año 2022, 324 fuentes divididas en revistas, libros y artículos evidenciando 2000 documentos, lo cual es un número de publicaciones significativo indicando el interés que han tenido diferentes autores a nivel mundial con 60931 referencias distintas.

Tabla 1
Información principal sobre los datos

Descripción	Resultados
Periodo de tiempo	2004:2022
Fuentes (revistas, libros, etc.)	324
Documentos	2000
Promedio de años desde la publicación	5,67
Promedio de citas por documentos	14,14
Promedio de citas por año por documento	1,99
Referencias	60931

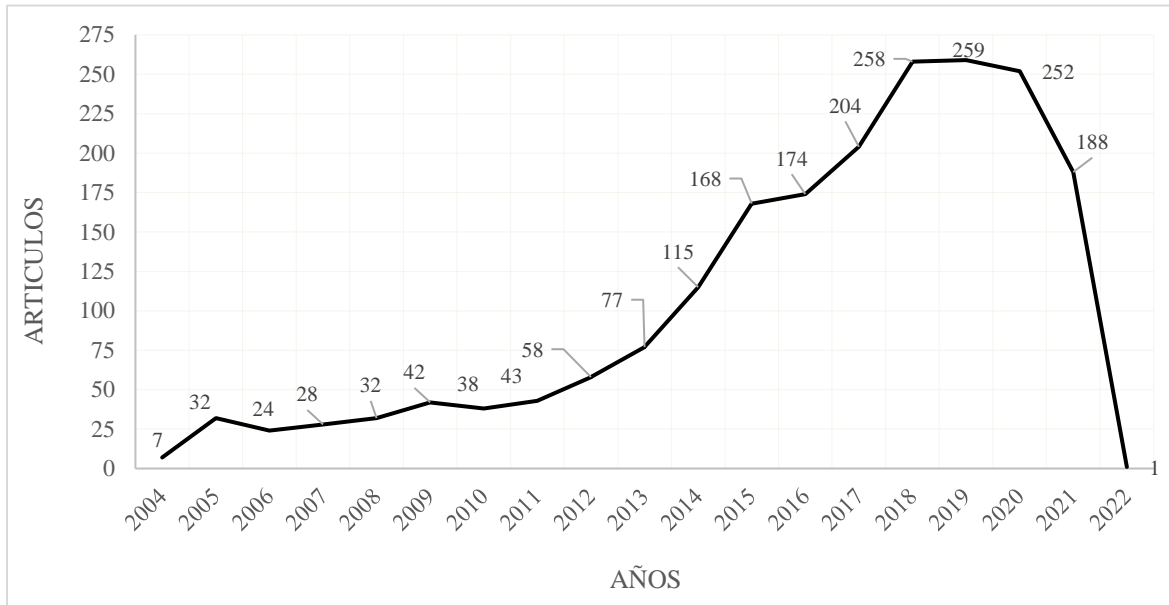
3. Resultados

3.1 Producción científica anual en el tema de fracturamiento hidráulico.

Se evidencia que desde el año 2004 se comenzaron a publicar temas relacionados con el fracturamiento hidráulico lo cual demuestra que el interés en las investigaciones ha sido directamente proporcional al tiempo, donde en el año 2014 comienza un crecimiento constante significativo en la publicación de dichos artículos, la figura 1 muestra que en el periodo (2004-2013) se publicaron 381 documentos perteneciendo este al 19,01 % del total de publicaciones, sin embargo, la próxima década aborda el 80,95 % de documentos hasta la fecha, perteneciendo este a un porcentaje muy alto a comparación de los años anteriores, En el año 2019 se evidencia el pico más alto en publicaciones con un total de 259, donde a partir del 2015 se da la iniciativa por parte del plan nacional de desarrollo “Prosperidad para todos” el aprovechamiento potencial de los recursos de hidrocarburos mitigando los riesgos ambientales de diferentes técnicas extractivas dando interés al fracturamiento hidráulico como prospectiva ecológica incentivando las reservas actuales (Rodríguez, 2021), del mismo modo, en la última década muchos países han optado por innovar métodos que le permitan tener una extracción de hidrocarburos mucho más rentable y amigable con el medio ambiente, Estados Unidos es uno de ellos, evolucionando desde el año 2010 la inyección de agua desde los subsuelos muy por debajo de los acuíferos, en algunos países Europa se viene implementando la reutilización del agua en pozos de inyección por medio de la evaporación, las empresas Schlumberger Limited y Halliburton destacadas por ser las mayores productoras de hidrocarburos ofreciendo servicios en yacimientos petroleros a nivel mundial, desempeñando su labor en más de 70 países, dan utilidad en los últimos años a productos de diseño únicos sin químicos ni biocidas para la extracción de hidrocarburos, (Martínez, 2015), por lo tanto se concluye que en las últimas décadas el impacto al medio ambiente ha sido uno de los principales motivos que ha interesado al mundo la investigación de nuevas técnicas para la extracción de hidrocarburos por medio de la fracturación hidráulica, permitiendo tener un mayor avance a nivel constructivo.

Figura 1

Producción científica Anual del tema fracturamiento hidráulico.



3.2 Fuentes con mayor número de publicaciones.

A partir de los documentos encontrados, en la tabla 2 se evidencia las 20 fuentes que tienen un mayor número de publicaciones hasta la fecha, “*Rock mechanics and rock engineering*” (Geomechanics Symposium 2020), es una revista de Austriaca perteneciente al cuartil 1 que ocupa el primer lugar con 180 publicaciones la cual mantiene un fuerte vínculo entre la ingeniería geológica y la ingeniería de rocas, proporcionando un puente entre los desarrollos fundamentales y las aplicaciones prácticas, como aberturas subterráneas, cimientos de grandes presas, taludes rocosos, siendo los temas específicos la ingeniería petrolera, los sistemas geotérmicos, el almacenamiento de energía, siendo a su vez la revista con mayor numero de h-index 36, determinando que el impacto en termino de citas ha sido sobresaliente, seguido de esta se encuentra la revista china “*chinese journal of rock mechanics and engineering*” (Cheng, 2001), la cual cubre una amplia gama de temas en mecánica de fracturas de los sistemas de materiales de ingeniería convencionales y aporta 136 documentos perteneciendo al cuartil 2, las siguientes 3 fuentes aportan 313 publicaciones siendo un numero significativo para la contribución de temas de fracturamiento hidraulico perteneciendo este al 29,17 % del total de los documentos publicados las fuentes más relevantes, a su vez dentro del top se encuentran revistas que mencionan temas sobre la aplicación de energía, ingeniería geológica, estructuras solidas entre otras, todo esto importante para el avance de diferentes obras de fracturamiento, permitiendo así tener un mejor manejo a futuros trabajos ingenieriles, cabe resaltar que la revista ingles ubicada en el cuartil 1 “*Applied energy*” (Jianzhong, 2022), a pesar de tener solo 26 articulos su h-index es de 19 indicando que el impacto de sus citas a sido bueno con respecto a las publicaciones realizadas.

Tabla 2*Impacto y numero de publicaciones de la fuente*

Fuentes	Artículos	h_index	g_index	m_index	TC	NP
Rock mechanics and rock engineering	180	36	56	2.57	3944	155
Vanshilixue yu gongcheng xuebao/chinese journal of rock Mechanics and engineering	136	21	31	1.10	1523	125
energies	132	17	23	2.12	1015	107
Engineering fracture mechanics	93	18	38	1.05	1655	87
Vantu lixue/rock and soil mechanics	88	14	23	0.77	798	80
International journal for numerical and analytical methods in geomechanics	56	1	1	0.1	23	1
Zhongguo shiyou daxue xuebao (ziran kexue ban)/journal of china university of petroleum (edition of natural science)	47	11	16	0.65	347	42
Computer methods in applied mechanics and engineering	38	18	32	1.38	1282	34
Energy science and engineering	37	8	12	1.6	188	27
Journal of geophysics and engineering	31	11	15	0.69	266	27
Energy	30	15	26	1.36	696	29
Caikuang yu anquan gongcheng xuebao/journal of mining and safety engineering	28	7	15	0.5	250	22
Applied energy	26	19	25	1.9	1531	25
Journal of energy resources technology transactions of the asme	25	9	15	0.69	244	21
Geotechnical and geological engineering	23	5	6	0.41	62	17
International journal of solids and structures	23	11	22	0.65	544	22
International journal of greenhouse gas control	21	13	21	0.93	785	21
Spe drilling and completion	21	8	14	0.5	216	16
Dongbei daxue xuebao/journal of northeastern university	19	5	7	0.41	68	13
Zhongguo kuangye daxue xuebao/journal of china university of mining and technology	19	9	13	0.6	196	19

3.3 Impacto de autor

El autor Chen Mian es el autor con más impacto (14) frente al tema del fracturamiento hidráulico, pertenece al laboratorio Estatal clave de recursos y prospección de Petróleo de la Universidad China del Petróleo, Beijing, China, se destaca por su gran número de publicaciones (33) y un gran número de total decitaciones (555) a comparación de los otros autores, una de sus publicaciones más destacadas es “*Hydraulic fracture initiation theory for a horizontal well in a coal seam*” (Chen & Hou 2013), en el cual se mencionan una serie de experimentos para determinar los parámetros mecánicos de la roca relacionados con la fracturación hidráulica del carbón, seguido de este 24 publicaciones pero con un menor número de citaciones (390), va el profesor de ingeniería de la Escuela de Minas de Colorado Ge jin, el cual ha tenido una gran relevancia con sus aportes a al fracturamiento hidráulico con el artículo “Hydraulic-fracture

geometry characterization using low-frequency DAS signal” (Gin & Baishali 2017), también cabe resaltar que tiene un índice h de 13, al igual que el autor qi zhang, lo cual indica que sus publicaciones han tenido como mínimo 13 citaciones, en ellas se destacan “*A review of laboratory studies and theoretical analysis for the interaction mode between induced hydraulic fractures and pre-existing fractures*” mencionando la fracturación hidráulica como una actividad que permite mejorar considerablemente la producción de petróleo y gas, especialmente en yacimientos no convencionales

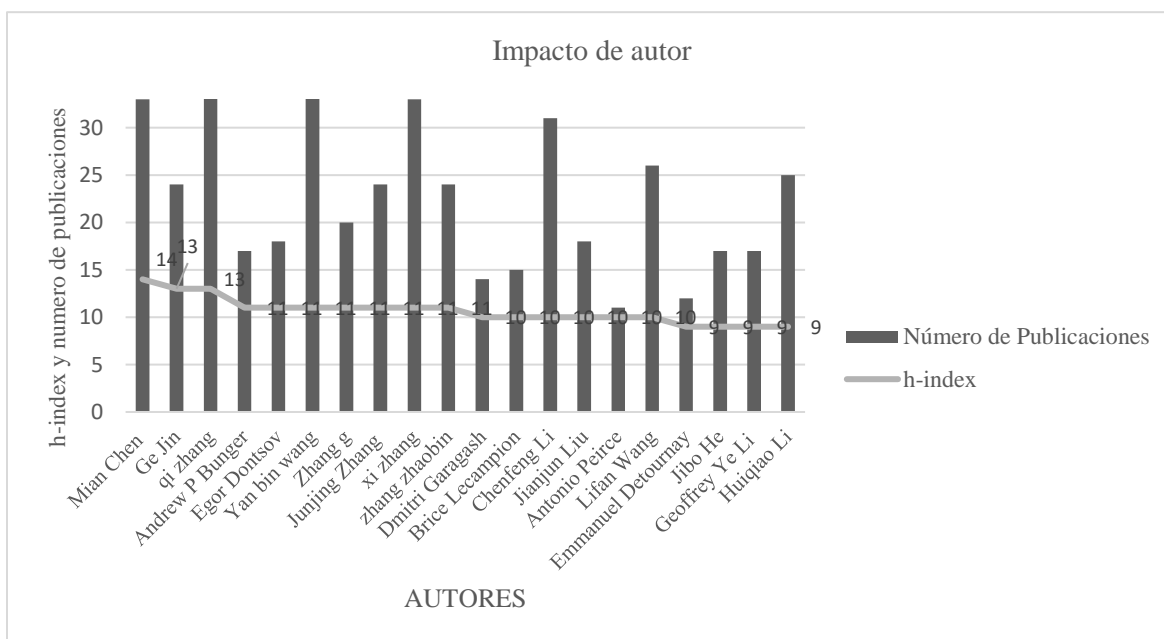
Tabla 3

Relacion H-index, G-index, M-index total de citaciones (TC) y Numero de publicaciones (NP)

Element	h_index	TC	NP	PY_start
Mian Chen	14	555	33	2005
Ge Jin	13	390	24	2005
Qi zhang	13	365	44	2005
Andrew P Bunger	11	621	17	2005
Egor Dontsov	11	509	18	2014
Yan bin wang	11	385	38	2007
Zhang g	11	327	20	2008
Junjing Zhang	11	360	24	2008
Xi zhang	11	733	33	2005
zhang zhaobin	11	323	24	2011
Dmitri Garagash	10	802	14	2005
Brice Lecampion	10	497	15	2007
Chenfeng Li	10	263	31	2009
Jianjun Liu	10	267	18	2012
Antonio Peirce	10	444	11	2007
Lifan Wang	10	418	26	2008
Emmanuel Detournay	9	784	12	2005
Jibo He	9	256	17	2015
Geoffrey Ye Li	9	401	17	2005
Huiqiao Li	9	170	25	2004

Figura 2

Relacion H-index y Numero de publicaciones (NP)



3.4 Clasificación de países con mayor número de publicaciones y mayor número de citaciones

La siguiente tabla se muestran los 20 países con mayor número de publicaciones sobre la fracturamiento hidráulico, China es un país que se ha caracterizado por sus grandes aportes a nivel investigativo y de construcción por lo cual ocupa el primer puesto generando un aporte de 2383 artículos publicados hasta la fecha, siendo este un número demasiado considerable para la evolución de las investigaciones presentes y futuras sobre este temas, en el puesto 2 con un número mucho más bajo que china pero mayor a los demás va Estados unidos con 777 publicaciones perteneciendo este al 19,36 % del total de las publicaciones, dentro del top 20 que se evidencia en la tabla 3, Europa y Asia son dos continentes que aportan la misma cantidad de países respecto al número de publicaciones, también se debe resaltar los países americanos que hacen referencia a un 24,07 % de las publicaciones realizad a nivel mundial dentro de la lista, a diferencia de los continentes de Oceanía y África que presentan poca participación sobre el tema tratado.

Tabla 4

Países clasificados con mayor número de publicaciones y total de citas

País	Artículos	Citas totales	Citas promedio de artículos
China	2383	8990	10,75
Estado Unidos	777	7421	24,09
Canadá	144	1195	19,59
Australia	127	939	19,56
Reino Unido	98	696	18,32
Alemania	77	760	26,21
Irán	65	650	22,41
Corea del Sur	49	418	19,9
Japón	47	340	22,67
Polonia	39	128	7,11
Francia	32	733	81,44
Italia	32	108	9,82
Brasil	23	57	5,7
Suiza	21	317	18,65
India	20	27	3,38
Arabia Saudita	19	26	5,20
España	19	225	45
Malasia	17	68	6,8
México	14	76	19,00
Argentina	9	34	5,67

Figura 3

Países clasificados con mayor número de publicaciones.



Figura 4

Top 10 países más citados



3.5 *Documentos con mayor número de citaciones a nivel mundial*

Se muestran los 10 documentos más citados a nivel mundial tal como lo indica la tabla 5, “*Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO₂*” (Middleton et al., 2015). es el documento que se encuentra en el primer lugar con 446 citaciones en el cual se mencionan temas sobre la industria y los investigaciones realizadas en las cuales se interesan por aumentar la producción, reducir los requisitos de agua siempre y cuando se minimice los impactos ambientales, su fecha de publicación fue el 23 de marzo de 2015 , a su vez es el documento con mayor citaciones promedio por año con un valor de 55.75, seguido de este va el artículo “*Numerical modeling of hydraulic fracture problem in permeable medium using cohesive zone model*” (Carriet & Granet 2012), lo cual tiene términos de coherencia con el tema de la Fractura hidráulica, modelos de zona cohesiva, Análisis de elementos finitos y acoplamiento hidromecánico, otro de los documentos que más hace relevancia dentro de los más citados dentro de la investigación son temas tratados de la ósmosis directa bien fractura mencionando la reutilización del agua e impulsado el tratamiento de aguas residuales, perteneciendo al artículo “*Forward osmosis treatment of drilling mud and fracturing wastewater from oil and gas operations*” (Hickenbottom., et al 2013) los dos artículos mencionados tienen 308 y 249 , también se evidencian dentro del top documentos que se interesan por el uso de perforación horizontal y fracturación hidráulica y mencionar técnicas que minimicen un riesgo ambiental potencial debido a su alto uso de agua y al riesgo sustancial de contaminación del agua.

Tabla 5*Documentos con mayor número de citaciones a nivel mundial*

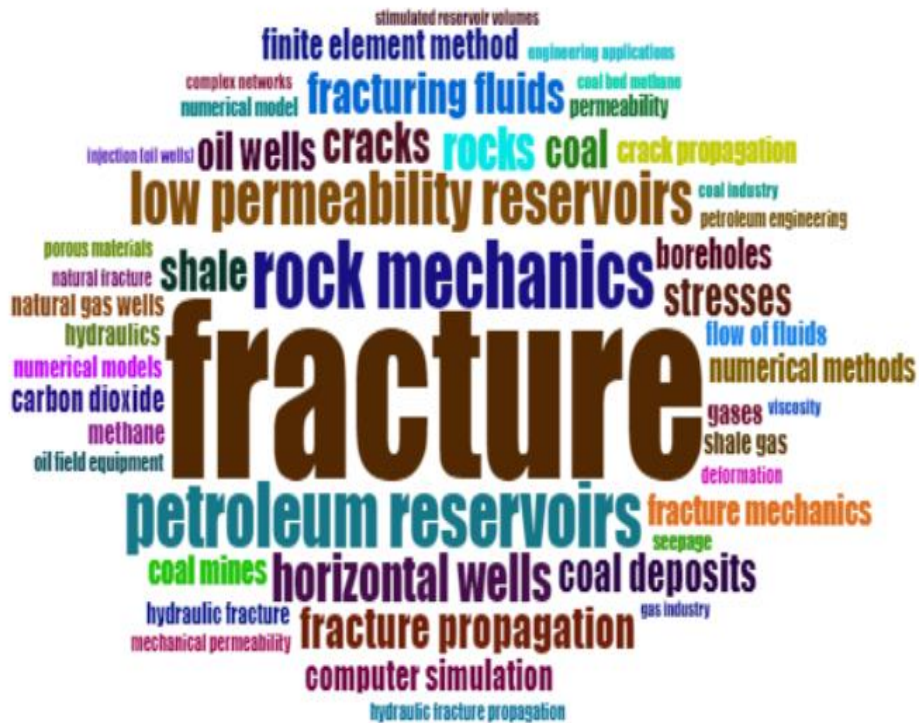
Autor	Artículo	Citas totales	CT por año	CT normalizado
Middleton Rs, 2015, Appl Energy	Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO2	446	55,75	17,6135
Carrier B, 2012, Eng Fract Mech	Numerical modeling of hydraulic fracture problem in permeable medium using cohesive zone model	308	28	11,8856
Hickenbottom Kl, 2013, Desalination	Forward osmosis treatment of drilling mud and fracturing wastewater from oil and gas operations	249	24,9	7,9655
Mcginnis Rl, 2013, Desalination	Pilot demonstration of the NH3/CO2 forward osmosis desalination process on high salinity brines	241	24,1	7,7096
Mohammadnejad T, 2013, Finite Elem Anal Des	An extended finite element method for hydraulic fracture propagation in deformable porous media with the cohesive crack model	236	23,6	7,5496
Rozell Dj, 2012, Risk Anal	Water Pollution Risk Associated with Natural Gas Extraction from the Marcellus Shale	230	20,9091	8,8756
Fu P, 2013, Int J Numer Anal Methods Geomech	An explicitly coupled hydro-geomechanical model for simulating hydraulic fracturing in arbitrary discrete fracture networks	215	21,5	6,8779
Lecampion B, 2009, Commun Numer Methods Eng	An extended finite element method for hydraulic fracture problems	207	14,7857	7,633
Gordeliy E, 2013, Comput Methods Appl Mech Eng-A	Coupling schemes for modeling hydraulic fracture propagation using the XFEM	174	17,4	5,5663
Liu F, 2013, Int J Greenh Gas Control	Assessing the feasibility of CO2 storage in the New Albany Shale (Devonian– Mississippian) with potential enhanced gas recovery using reservoir simulation	166	16,6	5,3103

3.6 Nube de palabras clave

La figura 5 muestra la nube de palabras clave la cual se clasifica de mayor a menor tamaño según su impacto y ocurrencia dentro de los artículos, Las palabras que más sobresalen son “*hydraulic fracturing*”, “*petroleum*”, “*reservoir*”, “*engineerin*” y “*fracture*”. Como palabra más usada dentro la investigación sobresale “*fracuramiento hidráulico*” con un total de 492 ocurrencias, siendo una palabra que se encuentra en la mayoría de las ideas principales de los artículos estudiados, dando entender el concepto general de la investigación planteada, definiendo conceptos específicos y generales, seguidamente esta la “*Ingeniería en yacimientos de petróleo*” con un valor de 256 y el tercer puesto lo ocupa la palabra “*fractura*” con 252 repeticiones.

Figura 5

Nube de palabras



4. Análisis y visualización estructural en publicaciones de investigación

4.1. Co-autoría entre países en las publicaciones

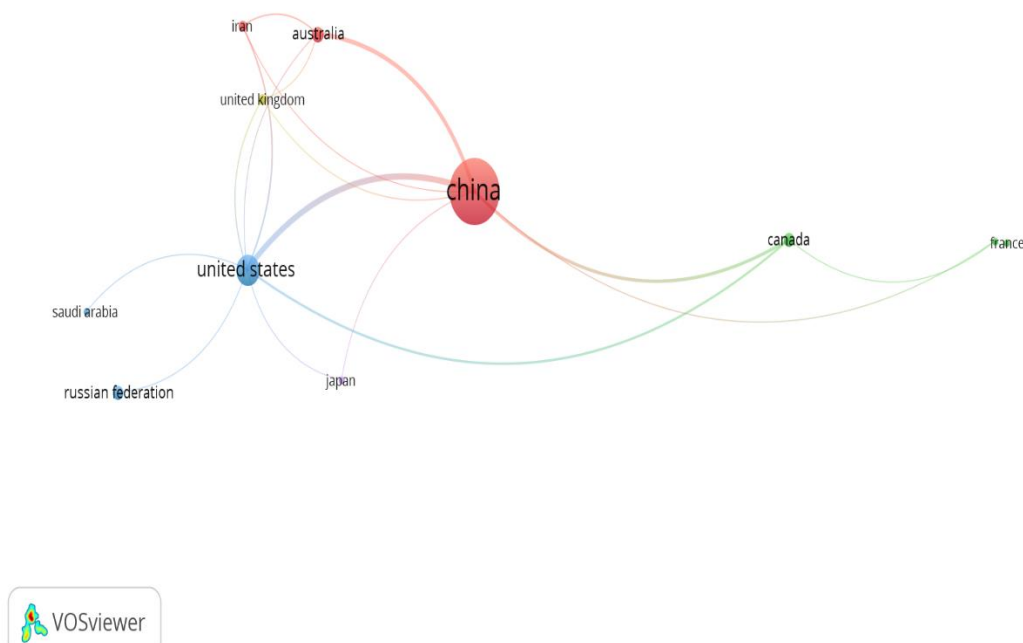
A partir de la figura 6 se puede evidenciar la red de coautoría entre países, que a partir de un filtro realizado solo muestra las naciones con un mínimo de 5 publicaciones y al menos 2 citas, en el gráfico se puede evidenciar los países que han tenido más relevancia por el tamaño de su círculo el cual es directamente proporcional a la cantidad de publicaciones hechas y el grosor de las líneas que representa la fuerza de colaboración entre los países que une.

China es el país que más ha contribuido a las diferentes publicaciones relacionadas con el fracturamiento hidráulico, el cual aporta 385 documentos hasta la fecha y 2913 citas, por ende, se evidencia que es un país con gran impacto a nivel mundial que aporta el avance de nuevas actividades que interfieren con el tema tratado, también se le atribuye la gran fuerza de enlace que presenta con los otros países de 62. En el segundo lugar se presenta Estados Unidos con 90 publicaciones y 1216 citas, mostrando una fuerza de enlace menor de 46 y el tercer país con mayor impacto es Australia que a pesar de tener una diferencia notable con los dos primeros tanto en publicaciones como en citas de 21 y 330, se le atribuye que sus publicaciones generan interés a comparación de otras naciones.

En la coautoría se evidencia la poca participación de países americanos, que a pesar de tener a Estados Unidos y Canadá dentro de los clusters, genera poca representación a nivel global, a diferencia de Europa, que proporciona gran cantidad de países dentro del estudio.

Figura 6

Red de coautoría entre países.



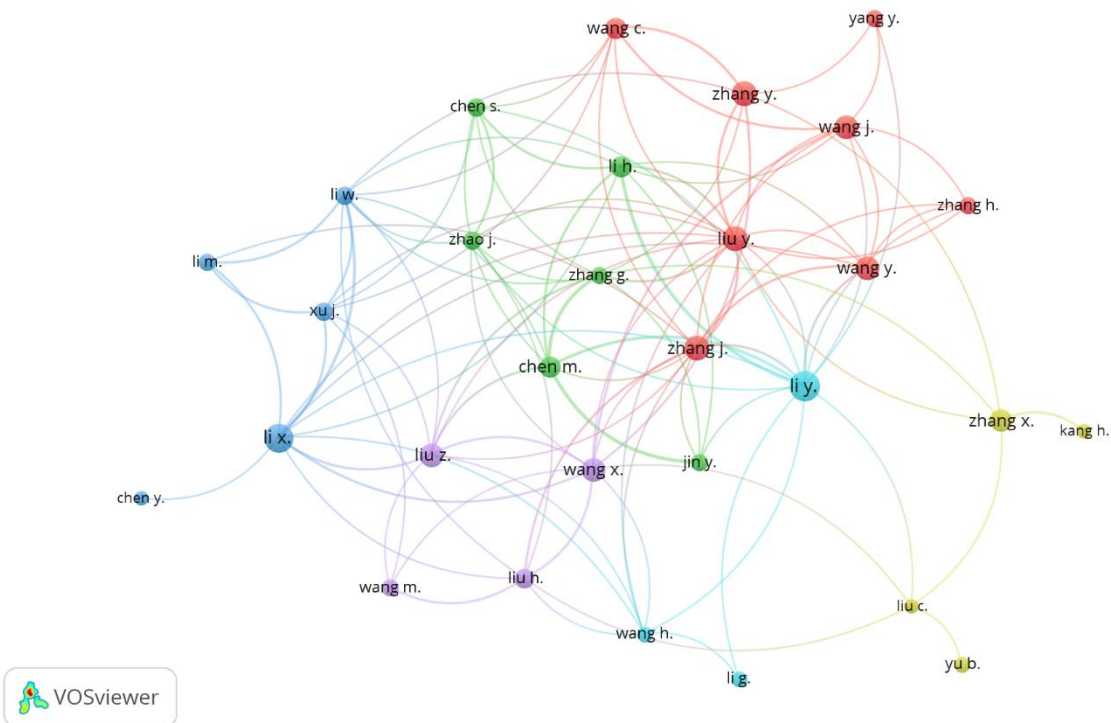
4.2 Co-autoría entre autores

La figura 7 muestra los autores con mayor impacto y su relación a partir de sus publicaciones realizadas, la cual se hizo con un filtro de 5 publicaciones y 50 citaciones como mínimo con el fin de mostrar una red más consolidada, por ende, a partir de la figura se debe resaltar los autores chinos como predominantes en el tema, xi zhang J y Junjing Zhang ambos con gran cantidad de citaciones de 50 y 108 y un numero de publicaciones de 8 y 7.

Por otra parte, también se destaca Chen Mian, afiliado a la Universidad China del Petróleo, Ubicada en Beijing, es una institución de educación superior construida por el Ministerio de Educación, reconocida como “la cuna de los talentos en la ciencia y la tecnología del petróleo cuenta con un total de 11 documentos publicados y 135 citaciones.

Figura 7

Red de Co-autoría entre autores.

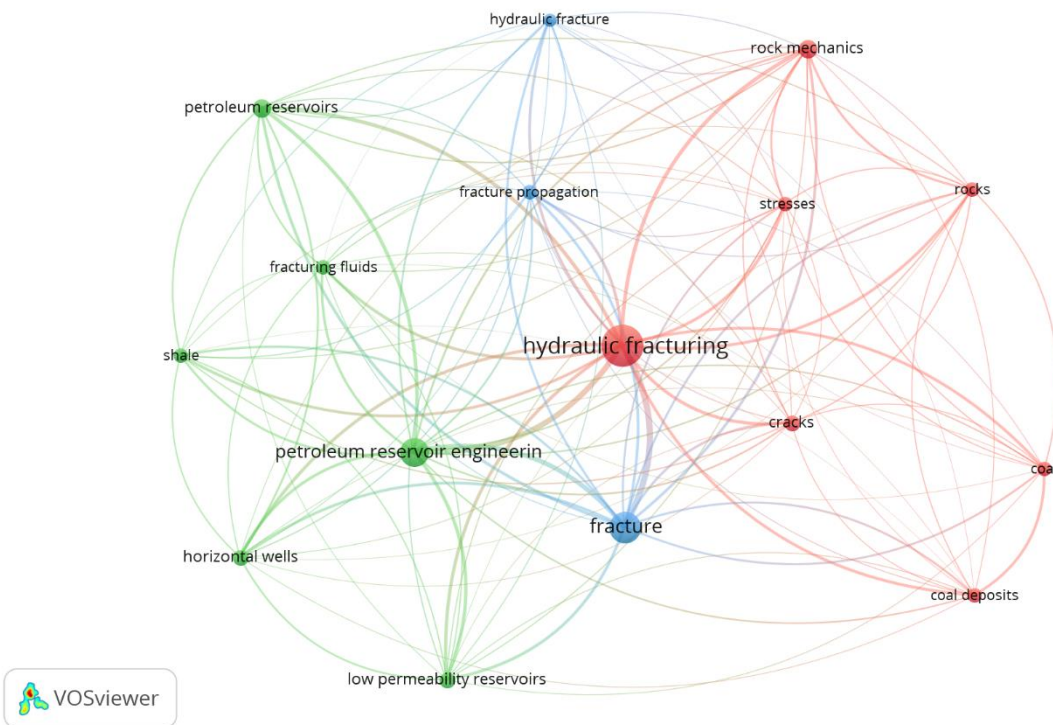


4.3 Co-ocurrencia de palabras clave en las publicaciones

La figura 8 representa la co-ocurrencia de las palabras que tienen mayor impacto en los documentos relacionados con el fracturamiento hidráulico, el estudio se realizó haciendo un filtro donde solo se muestran las palabras que como mínimo tienen 50 ocurrencias, en la figura se evidencia que la palabra con mayor impacto es “*hydraulic fracturing*” contando con 466 ocurrencias y una fuerza total de enlace de 1204. seguida de esta van “*fracture*” y *petroleum reservoir engineering*” con 260 y 234 concurrencias y entre los dos sumandos una fuerza de enlace de 1575, a su vez se evidencian palabras que también tienen una importancia dentro de la investigación como “*rock mechanics*”, “*low permeability reservoirs*” “*horizontal Wells*” y *fracture propagation*”

Figura 8

Red de co-ocurrencia de palabras clave



5. Conclusiones

Teniendo en cuenta el orden de ideas y la recopilación de información por medio de la base de datos Scopus y las herramientas de código abierto bibliometrix y Vos viewer, se establecen como instrumentos muy eficientes a la hora de realizar un artículo de investigación bibliométrico. En base esto, se concluye que el fracturamiento hidráulico ha tenido un interés particular a través del tiempo, que a pesar de que el 2004 fue el primer año de estudio, desde el 2013 se tiene un alza considerable en los aportes a nivel mundial donde se estima que desde este año hasta la fecha se han publicado 1696 documentos, divididos en 324 fuentes diferentes, siendo el año 2019, el periodo con mayor número de aportes con un total de 259 artículos, perteneciendo este a un 12,95% del total de las documentaciones realizadas, por ende, se identifica que el tema ha tenido un crecimiento razonable a medida que pasa el tiempo.

En el aporte de este tipo de documentos se exaltan la participación de diferentes países, el principal y con mayor contribución a nivel mundial es China que es un país que se caracteriza por su gran avance en tecnología e investigación, siendo su aporte de 2383 y 8990 citaciones. El país asiático no solo se caracteriza por la alta producción de artículos, sino que también, se vieron reflejadas sus afiliaciones, las cuales dentro de una lista de 20 universidades con mayor número de publicaciones, todas pertenecen a este País, sobresaliendo con 156 documentos *university of petroleum* la cual es una universidad estatal de doble primera clase especializada en economías emergentes y sistemas de petróleos y *La Universidad de Minería y Tecnología de China*, la cual es una universidad nacional clave bajo la supervisión directa del Ministerio de Educación y está clasificada como la mejor universidad minera de China teniendo una gran reputación mundial en tecnología e investigación de la minería del carbón la cual contribuyo con 148 documentos, A pesar de que los países asiáticos tienen mayor impacto sobre el tema, la distribución de las naciones con mayor número de publicaciones es muy equilibrada, donde Asia aporta 7 países dentro de los publicados los cuales son (China, Irán, Corea del sur, Japón, India, Arabia Saudita y Malasia), a su vez Europa aporta la misma proporción con (Reino Unido, Alemania, Italia , Francia, Suiza y España), y con dos países menos dentro del ranking , se encuentran los países americanos (Estados Unidos, Canadá, Brasil, México y Argentina) , esto puede ser de gran importancia ya que se evidencia que el aporte del fracturamiento hidráulico se ha visto en diferentes zonas a nivel mundial, contribuyendo esto a diferentes aportes culturales.

También es importante deducir que los documentos que más han tenido impacto dentro de este tipo de investigaciones son los que se relacionan con la industria y las investigaciones interesadas por aumentar la producción, reducir el uso del agua y minimizar los impactos ambientales, estos temas evidentemente se encuentran en el documento que tuvo mayor número de citaciones (446) el cual fue “*Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO₂*”, También tienen impacto los documentos donde se muestran los avances de la fractura hidráulica en diferentes modelos, serie de experimentos para determinar los parámetros mecánicos y acoplamiento hidromecánico, en estos temas se relacionan los autores que tienen mayor impacto los cuales fueron “*Mian Chen*” y “*Ge yin*”, ambos pertenecientes a comunidades ingenieriles y de investigación, el cual tienen 33 y 24 publicaciones y un número de citaciones de 555 y 390 el cual demuestran su gran impacto y contribuciones sobre el tema.

Por otro lado, también se evidencia la fuente que tuvo mayor impacto la cuales fue la revista “*Rock mechanics and rock engineering*” que ofrece un gran enlace entre la ingeniería convencional geológica y la ingeniería especializada de roca, esta tiene un aporte del 16,77 % del total de las fuentes con mayor número de publicaciones, siendo un porcentaje bastante amplio para solo una fuente.

Las palabras claves con más ocurrencia y que tienen una gran frecuencia considerable dentro de la investigación se encuentran “*hydraulic fracturing*” “*fracture*” y “*petroleum*”, así mismo, presentan una gran relevancia las definiciones de “*reservoir*” y “*engineering*”, la cual son palabras que se encuentran en las ideas principales y de mayor interés dentro de los artículos publicados.

Por último, es importante aclarar que el fracturamiento hidráulico al ser una actividad con grandes riesgos ambientales, pero del mismo modo con fuertes contribuciones económicas y industriales para una región, es importante llevar un control paulatino sobre todas sus actividades, permitiendo tener una serie de regulaciones y prácticas ecológicas que le permiten al ser humano abastecer su ecosistema de energía de manera responsable, previniendo al máximo los conflictos socioambientales, logrando una preservación y recuperación ambiental.

6. Referencias

Abdulraheem & Labadin Hybrid intelligent systems in petroleum reservoir characterization and modeling: the journey so far and the challenges ahead *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* volume 7, pages251–263 (2017)

Benavides; B Leon E, información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático ideam–meteo/008-2007 nota técnica del ideam/ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

Carriet B., Granet S Numerical modeling of hydraulic fracture problem in permeable medium using cohesive zone model *Engineering Fracture Mechanics* Volume 79, January 2012 <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.11.012>

Charry S., Ocampo A., Perez J, “Efectos de la estimulación hidráulica (fracking) en el recurso hídrico: Implicaciones en el contexto colombiano,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 28, no. 1, pp. 135-164. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2549>

Cheng, Y., Zhang, Y., Yu, Z., Hu, Z., & Yang, Y. (2020). An investigation on hydraulic fracturing characteristics in granite geothermal reservoir. *Engineering Fracture Mechanics*, 237(April), 107252. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107252>

Cheng, x., Xue S, Zong G (2001) *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 1000-6915 © 2006 Oripobe Information Services, Inc. All rights reserved

Chuprakov, D., Melchaeva, O., & Prioul, R. (2014). Injection-sensitive mechanics of hydraulic fracture interaction with discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(5), 1625–1640. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0596-7>

D. Chuprakov y A. S. Zhubayev, “A variational approach to analyze a natural fault with hydraulic fracture based on the strain energy density criterion,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 53, no. 3, pp. 221-232, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2010.06.007>

Dusseault, M. B. (2011a). Geomechanical Challenges in Petroleum Reservoir Exploitation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), 669–678. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-0007-5>

Dusseault, M. B. (2011b). Geomechanical Challenges in Petroleum Reservoir Exploitation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), 669–678. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-0007-5>

Geomechanics Symposium, Golden, CO, 2020 Special Issue: Introduction to Selected Contributions from the 54th US Rock Mechanics (Issue 5, May 2022- Vol 22)

Ge, J., Jerath, S., & Ghassemi, A. (2020). Semianalytical modeling on 3D stress redistribution during hydraulic fracturing stimulation and its effects on natural fracture reactivation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 44(8), 1184–1199. <https://doi.org/10.1002/nag.3056>

Hickenbottom K, Hancock N, Hutchings N, Appleton E, G. Beaudry Forward osmosis treatment of drilling mud and fracturing wastewater from oil and gas operations *Desalination* Volume 312, 1 March 2013, Pages 60-66 <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.037>

Hou, B., Chen, M., Wang, Z., Yuan, J. y Liu, M. (2013). Teoría de iniciación de fractura hidráulica para un pozo horizontal en una veta de carbón. *Ciencias del petróleo* , 10 (2), 219-225.

Hu, Y., Wang, Q., Zhao, J., Chen, S., Zhang, G., Wang, S., Wang, Z., & Fu, C. (2020). Study on induced stress of hydraulic fracturing in fractured-porous elastic media. *Energy Science and Engineering*, 8(9), 3314–3332. <https://doi.org/10.1002/ese3.721>

Jiménez J The beginning of fracking in Colombia: Regulatory changes to achieve evolution (2021) / N° 2109585

Jianzhong, Agregação Ph *Applied Energy* ISSN: 0306-2619

Jin, G. y Roy, B. (2017). Caracterización de la geometría de la fractura hidráulica mediante señal DAS de baja frecuencia. *La vanguardia* , 36 (12), 975-980.

Jia, P., Cheng, L., Huang, S., & Li, Q. (2015). A semi-analytical model for transient flow behavior of hydraulic fracture networks. *Zhongguo Shiyou Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of*

China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 39(5), 107–116.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5005.2015.05.015>

Jia, P., Ma, M., Cheng, L., & Clarkson, C. R. (2020). A semi-analytical model for capturing dynamic behavior of hydraulic fractures during flowback period in tight oil reservoir. *Energy Science and Engineering*, 8(10), 3415–3440. <https://doi.org/10.1002/ese3.769>

Rodriguez. (2021). No Análisis del fracturamiento hidráulico (fracking) como posible técnica de exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales en Colombia

Li, C., Ye, J., Yang, J., & Zhou, J. (2020). Performance evaluation of multiple fractured horizontal wells in shale gas reservoirs. *Energy Science and Engineering*, 8(10), 3657–3671. <https://doi.org/10.1002/ese3.773>

Li, L. C., Tang, C. A., Li, G., Wang, S. Y., Liang, Z. Z., & Zhang, Y. B. (2012). Numerical simulation of 3D hydraulic fracturing based on an improved flow-stress-damage model and a parallel FEM technique. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(5), 801–818. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0252-z>

Li, Y., Cui, X., Li, H., Chen, S., & Chen, M. (2021). Application of supercritical water conditions to improve the flowback of fracturing fluid in ultra-low-permeability sandstone formations. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 121(8), 110273. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110273>

Li, Z., Qi, Z., Yan, W., Huang, X., Xiao, Q., Mo, F., & Fang, F. (2020). New algorithm to simulate fracture network propagation using stationary and moving coordinates in naturally fractured reservoirs. *Energy Science and Engineering*, 8(11), 4025–4042. <https://doi.org/10.1002/ese3.793>

Liu, F., Ellett, K., Xiao, Y., & Rupp, J. A. (2013). Assessing the feasibility of CO₂ storage in the New Albany Shale (Devonian-Mississippian) with potential enhanced gas recovery using reservoir simulation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 17, 111–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.04.018>

Liu, R., Liu, Z., & Wheeler, M. F. (2020). A DG-based interface element method for modeling hydraulic fracturing in porous media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 370, 113284. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113284>

Massimo A, Cuccurullo C Primeros pasos y técnicas avanzadas con BiblioShiny App Materiales didácticos del Curso de Técnicas Bibliométricas Avanzadas EC3metrics - 19-23 de Octubre (2016)

Marín, E. (2015). “Fracking” en Colombia: un Estudio sobre su Constitucionalidad y Legalidad. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Derecho. Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/14531>

Martínez, R. (2015) “Diccionario del petróleo venezolano”, Los Libros de El Nacional, Caracas.

Medlin, W. L. (1979). Spe 6087. Vacuum, 1.

Melcher, H., Mayerhofer, M., Agarwal, K., Lolon, E., Oduba, O., Murphy, J., Ellis, R., Fiscus, K., Shelley, R., & Weijers, L. (2020). Shale-oil-fracturing designs move to just-good-enough proppant economics with regional sand. *SPE Drilling and Completion*, 35(4), 628–643.

<https://doi.org/10.2118/199751-PA>

Middleton R, Willian C, Hyman Q, Hari S Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO2
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.023>
Volume 147, 1 June 2015, Pages 500-509

Montenegro, (2020) Fundacion universidad de america facultad de ciencias económicas y administrativas. especializacion de negocios internacionales e integracion economica. bogota d.c / el fracking como alternativa para la economia naciona

Ocampo C, Sharel; Perez, Anibal J. efectos de la estimulación hidráulica (fracking) en el recurso hídrico: implicaciones en el contexto colombiano ciencia e ingeniería neogranadina, vol. 28, núm. 1, 2018 universidad militar nueva granada, Colombia disponible en:
doi: <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.18359/rcin.2549>

Profit, M., Dutko, M., Yu, J., Cole, S., Angus, D., & Baird, A. (2016). Complementary hydro-mechanical coupled finite/discrete element and microseismic modelling to predict hydraulic fracture propagation in tight shale reservoirs. *Computational Particle Mechanics*, 3(2), 229–248.
<https://doi.org/10.1007/s40571-015-0081-4>

R. Heinberg. *Snake Oil: How Fracking's False Promise of Plenty Imperils Our Future*. Gran Bretaña: Clairview Books, 2014.

Rueda, J., Mejia, C., Quevedo, R., & Roehl, D. (2020). Impacts of natural fractures on hydraulic fracturing treatment in all asymptotic propagation regimes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 371, 113296. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113296>

Settari, A., & Price, H. S. (1984). Simulation of Hydraulic Fracturing in Low-Permeability Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 24(2), 141–152.
<https://doi.org/10.2118/8939-PA>

Soliman, J. Daal y L. East, “Fracturing unconventional formations to enhance productivity,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 8, pp. 52-67, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2012.01.007>

Suárez Santana, M. A. (2013). El fracturamiento hidráulico y sus implicaciones normativas y regulatorias para el desarrollo de yacimientos no convencionales en Colombia.

Suarez H., Cortes E, Carrasco S (2008) Biocombustibles y autosuficiencia energética Dyna, Año 76, Nro. 158, pp. 101-110. Medellín, Junio de 2009. ISSN 0012-7353

Shi, J., Zhang, J., Zhang, C., Jiang, T., & Huang, G. (2021). Numerical model on predicting hydraulic fracture propagation in low-permeability sandstone. *International Journal of Damage Mechanics*, 30(2), 297–320. <https://doi.org/10.1177/1056789520963206>

U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), “Hydraulic Fracturing for Oil and Gas: Impacts from the Hydraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resources in the United States. Executive Summary.” Office of Research and Development, Washington, DC. EPA/600/R-16/236ES, 2016

Unidad de Planeación Minero Energética. (2018). Evaluación de las cuencas y estructuración de escenarios de oferta de hidrocarburos convencionales y no convencionales. 11, 1–393. <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1340/4/v.4.pdf>

Valderrama, J., & Idrovo, A. J. (2019). Fracking, yacimientos en roca generadora y salud humana: Entre la incertidumbre y la precaución. *Revista Salud UIS*, 51(2), 100. doi:<http://dx.doi.org/10.18273/revsal.v51n2-2019001>

Vergel, M. y Becerra, L. Impactos del fracking y una mirada del panorama colombiano. *Jou. Cie. Ing.*, vol. 12, no. 1, pp. 264-274, 2020. doi:10.46571/JCI.2020.1.23

Waltman ludo Nees Jan van Eck, Centro de Estudios de Ciencia y Tecnología (CWTS), de la Universidad de Leiden. Blog de la biblioteca de Traducción y Documentación de la Universidad de Salamanca.

Yuan, Y., Xu, T., Moore, J., Lei, H., & Feng, B. (2020). Coupled Thermo–Hydro–Mechanical Modeling of Hydro-Shearing Stimulation in an Enhanced Geothermal System in the Raft River Geothermal Field, USA. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(12), 5371–5388. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02227-8>

Zangeneh, N., Eberhardt, E., & Bustin, R. M. (2014). Investigation of the influence of natural fractures and in situ stress on hydraulic fracture propagation using a distinct-element approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(7), 926–946. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0366>

Zhang, Q., Zhang, XP y Sun, W. (2021). Una revisión de estudios de laboratorio y análisis teórico para el modo de interacción entre fracturas hidráulicas inducidas y fracturas preexistentes. *Revista de ciencia e ingeniería del gas natural* , 86 , 103719.