



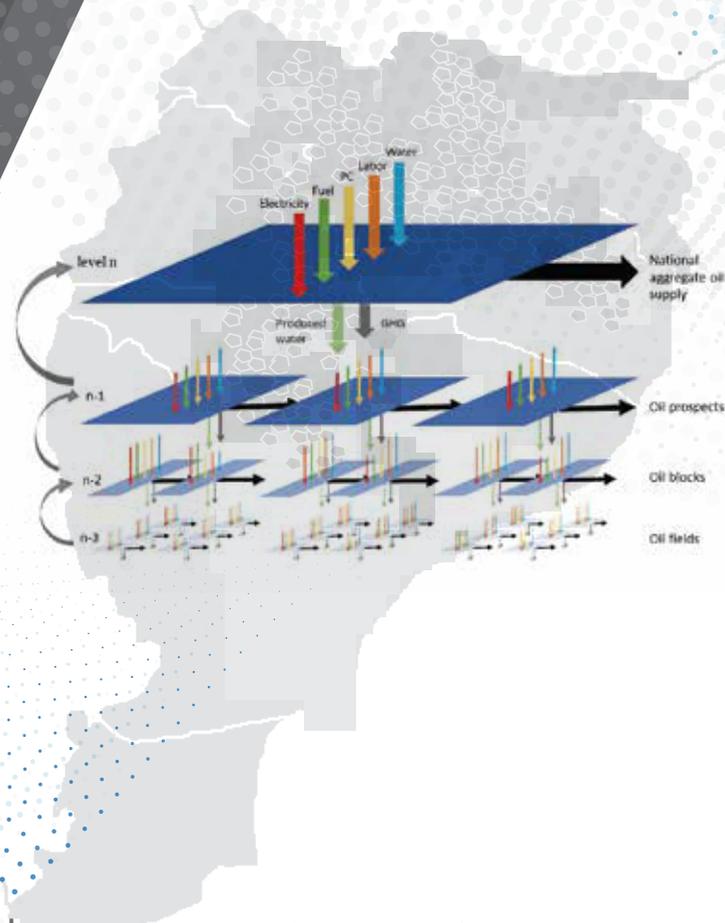
Universitat Autònoma de Barcelona

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi queda condicionat a l'acceptació de les condicions d'ús establertes per la següent llicència Creative Commons:  http://cat.creativecommons.org/?page_id=184

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis queda condicionado a la aceptación de las condiciones de uso establecidas por la siguiente licencia Creative Commons:  <http://es.creativecommons.org/blog/licencias/>

WARNING. The access to the contents of this doctoral thesis it is limited to the acceptance of the use conditions set by the following Creative Commons license:  <https://creativecommons.org/licenses/?lang=en>

AUTOR: RONY MAURICIO PARRA JÁCOME
DIRECTOR: DR. MARIO GIAMPIETRO



BIOPHYSICAL CONSTRAINTS OF FOSSIL ENERGY SYSTEMS: STUDYING THE METABOLISM OF ECUADOR'S OIL EXTRACTION-METHODOLOGIES AND APPLICATION

TESIS DOCTORAL
DOCTORADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTALES
INSTITUTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTALES
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BARCELONA

BARCELONA, SEPTIEMBRE 2020

**BIOPHYSICAL CONSTRAINTS OF FOSSIL
ENERGY SYSTEMS: STUDYING THE
METABOLISM OF ECUADOR'S OIL
EXTRACTION-METHODOLOGIES AND
APPLICATION**

BIOPHYSICAL CONSTRAINTS OF FOSSIL ENERGY SYSTEMS: STUDYING THE METABOLISM OF ECUADOR'S OIL EXTRACTION-METHODOLOGIES AND APPLICATION

TESIS DOCTORAL

Rony Mauricio Parra Jácome

Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambientales
Instituto de Ciencia y Tecnología Ambientales
Universidad Autònoma de Barcelona

DIRECTOR:

Dr. Mario Giampietro

Barcelona, septiembre 2020

*La disertación de mi tesis doctoral se la dedico a mi esposa Daniela y
mis hijos Vale y Sebas, quienes cada día me inspiran la pasión
necesaria para conseguir mis objetivos.*

AGRADECIMIENTOS

En la construcción de mi PhD, tuve la oportunidad de conocer a personas valiosas y con un espíritu de colaboración desinteresada, con quienes compartí discusiones académicas y científicas, fabulosas actividades de recreación y hasta momentos álgidos que se lograron sobreponer con la buena predisposición de mis colegas. Quiero agradecer a Alevgul Sorman, quien me motivó para vincularme al grupo de investigadores del ICTA, a Jesús Ramos con quien a más de los temas de investigación y contribución académica, compartimos ideales en Ecuador, a Juan Cadillo un buen compañero de trabajo en el CEPROEC y quien fue una de las personas que me impulsó a seguir mi PhD, a Rafael Gonzales y Louisa Di Felice con quienes tuve la oportunidad de trabajar los temas de energía.

Quiero agradecer de manera especial a Mario Giampietro y a Sandra Bukkens por todo su apoyo académico, científico y de amistad brindado en todo el proceso de mi trabajo de investigación, a Cristina Duran por su buena gestión y rápidas respuestas a mis solicitudes. Finalmente, debo decir que es una experiencia de vida gratificante formar parte de los investigadores del ICTA-UAB.

RESUMEN

Resumen Español

La extracción masiva de fuentes primarias de energía de alta calidad, después de la madurez de la revolución industrial, marcó el modernismo de la humanidad. La opulencia en la forma de vida de las sociedades y el fácil acceso a los recursos energéticos generaron la peligrosa suposición de un crecimiento económico infinito que ahora se ha convertido en una amenaza, finalmente estamos aprendiendo que la disponibilidad de recursos es limitada poniendo en riesgo la sostenibilidad del actual sistema socioeconómico.

La acelerada transformación en la red de usos energéticos de los sistemas socioeconómicos, determinan una demanda creciente de energía y a la vez tiende a aumentar la disponibilidad y accesibilidad de las infraestructuras. La reducción de las existencias de fuentes de energía primaria, sumada a la necesidad emergente para descarbonizar las economías modernas, está generando una crisis de sostenibilidad en la interacción de sociedades, economías y ecosistemas.

La reproducción de los sistemas socioeconómicos depende de su capacidad interna en la organización de actividades sociales, para satisfacer las necesidades de bienes y productos asociados con un esquema de crecimiento económico elegido. Esto requiere superar los límites internos sobre la capacidad de controlar las transformaciones de energía en relación con la creciente presión en términos de demanda y usos de energía. Al mismo tiempo, el sistema enfrenta limitaciones biofísicas externas marcadas por la escasez progresiva de las fuentes tradicionales de energía primaria y la capacidad de la naturaleza para absorber y regenerar desechos.

El concepto de "peak oil" en las tendencias de producción de petróleo de alta calidad ahora está bien establecido. Esto se refleja en la dinámica hacia la extracción de reservas de petróleo no convencionales y de menor calidad que exigen mayores flujos de materiales y energía en la vía metabólica. Al mismo tiempo, los países desarrollados mantienen un compromiso oneroso pero ineficaz para la sustitución parcial y/o total de las fuentes fósiles por energías renovables. Este esfuerzo requiere la generación de un

nuevo campo de investigación completo capaz de suministrar la información requerida sobre la viabilidad biofísica de estas soluciones.

Esta tesis propone ampliar el entendimiento de los problemas que atañe a los sistemas energéticos actuales, analizando a profundidad el rendimiento de la extracción de petróleo como fuente primaria de energía y su relación con la sociedad en la producción de energy carrier para garantizar las funciones requeridas del sistema, identificando sus limitaciones biofísicas en términos de escasez y sumidero.

El trabajo presenta metodologías contables innovadoras basadas en aplicaciones del esquema contable MuSIASEM que facilitan la comprensión de las implicaciones biofísicas de la extracción de petróleo. Las aplicaciones se ilustran en un análisis multiescala e integrado del sector petrolero ecuatoriano, evitando la simplificación de la información, típica del reduccionismo, que se encuentra en estudios similares realizados con narrativas económicas clásicas.

El enfoque propuesto integra la caracterización de varios factores relevantes en una definición de criterios múltiples del desempeño de un proceso de extracción de fuentes de energía primaria. Identifica perfiles de entradas y salidas para varios flujos y fondos utilizando el concepto de "procesadores estructurales" que se pueden definir en diferentes niveles de análisis, es decir, campo / bloque / área geográfica. Las combinaciones de procesadores estructurales se analizan como sistemas complejos funcionales cuyas características dependen de la calidad del recurso explotado, es decir, la producción de petróleo pesado, medio y ligero. De esta manera, se logra estudiar los cambios en el rendimiento de los campos petroleros debido a su envejecimiento. Los cambios en la disponibilidad y calidad del petróleo (y la necesidad de agua dulce) afectan los niveles de presión ambiental en términos de la capacidad de sumidero requerida para absorber el agua contaminada y las emisiones de GEI.

Este marco permite estudiar la relación presente y futura entre la fuente primaria de energía (extracción de petróleo) disponible para una sociedad y su capacidad para producir, distribuir y usar productos intermedios para garantizar sus usos finales en los diversos sectores socioeconómicos. Para lograr esta tarea, el marco analítico genera escenarios futuros que permiten la comprensión metabólica de las actividades de los

sistemas de extracci3n de petr3leo. Es decir, permite la identificaci3n de tasas metab3licas y restricciones biof3sicas tanto en el lado de la oferta (sistema de extracci3n de petr3leo) como en el lado de la demanda (usos finales de energ3a) en la sociedad ecuatoriana. Debido a la integraci3n del an3lisis cuantitativo a trav3s de diferentes dimensiones y niveles de an3lisis, los resultados de este tipo de an3lisis proporcionan informaci3n relevante para las discusiones sobre pol3tica energ3tica en el 3mbito t3cnico, econ3mico y ambiental

Palabras clave: Sostenibilidad, Metabolismo Social, Metabolismo Energ3tico, Fuente primaria de energ3a, sistemas de energ3a, extracci3n de petr3leo, Ecuador.

Resumen Catal3n

L'extracci3n massiva de fonts d'energia prim3ria d'alta qualitat, despr3s de la maduresa de la revoluci3n industrial, va marcar el modernisme de la humanitat. L'opul3ncia en la forma de vida de les societats i un f3cil acc3s als recursos energ3tics van generar l'assumpci3n perillosa d'un creixement econ3mic infinit, que s'ha convertit en una amenaça, ara que finalment estem assabentant que la disponibilitat de recursos 3s limitada.

La transformaci3n accelerada a la xarxa d'usos energ3tics en sistemes socioecon3mics que determinen una demanda creixent tendeix a desbordar la disponibilitat i l'accessibilitat de les infraestructures. La reducci3n d'estocs de fonts d'energia prim3ria, sumada a la necessitat emergent de descarbonitzar les economies modernes, est3 generant una crisi de sostenibilitat en la interacci3n de societats, economies i ecosistemes.

La reproducci3n dels sistemes socioecon3mics dep3n de la seva capacitat interna d'organitzar activitats socials per satisfer el requisit de b3ns i productes associats a un esquema de creixement econ3mic escollit. Aix3 requereix superar els l3mits interns de la capacitat de controlar les transformacions energ3tiques en relaci3n amb la pressi3n creixent en termes de demanda i usos energ3tics. Al mateix temps, el sistema s'enfronta a limitacions biof3siques externes marcades per l'escassetat progressiva de les fonts d'energia prim3ria tradicionals i la capacitat de la natura d'absorbir i regenerar residus.

El concepte de “pic” en les tendències de producció d’oli d’alta qualitat ja està ben establert. Això es reflecteix en la dinàmica cap a l’extracció de reserves de petroli poc convencionals i de menor qualitat que exigeixen majors fluxos de materials i energia a la via metabòlica. Al mateix temps, els països desenvolupats mantenen un compromís onerós però poc efectiu per a la substitució parcial o total de fonts fòssils per energia renovable. Aquest esforç requereix la generació d’un camp complet d’investigació complet, capaç d’aportar la informació requerida sobre la viabilitat i viabilitat biofísica d’aquestes solucions.

Aquesta tesi proposa ampliar la comprensió dels problemes relacionats amb els sistemes energètics actuals. Ho fa analitzant en profunditat el rendiment de l’extracció de petroli com a font d’energia primària i la seva relació amb la societat en la producció de portadors d’energia, identificant les seves limitacions biofísiques en termes d’escassetat i pica.

Aquesta tesi presenta metodologies comptables innovadores basades en aplicacions de l’esquema de comptabilitat MuSIASEM que facilita la comprensió de les implicacions biofísiques de l’extracció de petroli. Les aplicacions s’il·lustren en un anàlisi integrat a escala i integrada del sector del petroli equatorià, evitant la simplificació d’informació, pròpia del reduccionisme, trobada en estudis similars realitzats amb narracions econòmiques clàssiques.

L’enfocament proposat integra la caracterització de diversos factors rellevants en una definició de criteris múltiples del rendiment d’un procés d’extracció de fonts d’energia primària. Identifica perfils d’entrades i sortides rellevants de fluxos i fons descrits mitjançant el concepte de “processadors estructurals” que es poden definir a diferents nivells d’anàlisi (és a dir, camp / bloc / àrea geogràfica). Les combinacions de processadors estructurals s’analitzen com complexos funcionals les característiques depenen de la qualitat del recurs explotat (és a dir, de producció pesada, mitjana i lleugera). D’aquesta manera, podem estudiar els canvis en el rendiment dels camps petrolers a causa del seu envelliment. Els canvis en la disponibilitat i la qualitat del petroli (i la necessitat d’aigua dolça) afecten els nivells de pressió ambiental en termes de capacitat de l’aigüera necessària: absorbir l’aigua contaminada i les emissions de GEH.

Aquest enquadrament permet estudiar la relació actual i futura entre la font d'energia primària (extracció de petroli) disponible per a la societat i la seva capacitat per produir, distribuir i utilitzar productes intermedis per garantir els seus usos finals en els diferents sectors socioeconòmics. Per assolir aquesta tasca, el marc analític genera escenaris futurs que permeten la comprensió metabòlica de les activitats dels sistemes d'extracció d'oli. És a dir, permet la indentificació de les taxes metabòliques i les restriccions biofísiques tant en el costat de l'oferta (sistema d'extracció de petroli) com en el costat de la demanda (usos finals d'energia) a la societat equatoriana. A causa de la integració de l'anàlisi quantitativa a diferents dimensions i nivells d'anàlisi, els resultats d'aquest tipus d'anàlisis proporcionen informació destacada a les discussions sobre polítiques energètiques en l'àmbit tècnic, econòmic i ambiental.

Paraules clau:

Sostenibilitat, Metabolisme Social, Metabolisme Energètic, Font primària d'energia, sistemes d'energia, extracció de petroli, Equador.

Resumen Inglés

The massive extraction of high-quality primary energy sources, after the maturity of the industrial revolution, marked the modernism of humankind. Opulence in the way of life of societies and an easy access to energy resources generated the dangerous assumption of infinite economic growth, which has become a threat, now that we finally are learning that the availability of resources is limited.

The accelerated transformation in the network of energy uses in socio-economic systems determining a growing demand tends to overgrow the availability and accessibility of infrastructures. The reduction of stocks of primary energy sources, added to the emerging need to decarbonize modern economies, is generating a crisis of sustainability in the interaction of societies, economies and ecosystems.

The reproduction of socioeconomic systems depends on its ability internal to organize social activities to satisfy the requirement of goods and products associated with a chosen economic growth scheme. This requires overcoming internal limits to the ability of

controlling energy transformations in relation to the growing pressure in terms of demand and energy uses. At the same time, the system faces external biophysical limitations marked by the progressive scarcity of traditional primary energy sources and nature's ability to absorb and regenerate waste.

The concept of “peak” in the trends of production of high quality oil is now well established. This is reflected by the dynamics towards the extraction of unconventional and lower quality oil reserves that demand greater flows of materials and energy in the metabolic pathway. At the same time, developed countries maintain an onerous but ineffective commitment to the partial or total substitution of fossil sources with renewable energy. This effort requires the generation of a complete new field of research capable of supplying the require information over the biophysical feasibility and viability of these solutions.

This thesis proposes to expand the understanding of the problems related to current energy systems. It does so by analyzing in depth the performance of oil extraction as a primary source of energy and its relationship with society in the production of energy carriers, identifying its biophysical limitations in terms of scarcity and sink.

This thesis presents innovative accounting methodologies based on applications of the MuSIASEM accounting scheme facilitating the understanding of the biophysical implications of oil extraction. The applications are illustrated in a multi-scale and integrated analysis of the Ecuadorian oil sector, avoiding the simplification of information, typical of reductionism, found in similar studies carried out using classic economic narratives.

The proposed approach integrates the characterization of several relevant factors into a multi-criteria definition of the performance of a process of extraction of primary energy sources. It identifies profiles of relevant inputs and outputs of flows and funds described using the concept of “structural processors” that can be defined across different levels of analysis – i.e. field / block / geographical area. Combinations of structural processors are analyzed as functional complexes whose characteristics depend on the quality of the exploited resource – i.e. heavy, medium, and light oil production. In this way, we can study changes in the performance of oil fields due to their aging. Changes in the

availability and quality of oil (and the need for freshwater) do affect the levels of environmental pressure in terms of required sink capacity - to absorb polluted water and GHG emissions.

This framing allows to study the present and future relation between the primary source of energy (oil extraction) available to a society and its ability to produce, distribute and use intermediate products to guarantee their end uses in the various socioeconomic sectors. To achieve this task the analytical framework generates future scenarios allowing the metabolic understanding of the activities of the oil extraction systems. That is, it allows the identification of metabolic rates and biophysical constraints both in the supply side (oil extraction system) and in the demand side (energy end uses) in the Ecuadorian society. Due to the integration of the quantitative analysis across different dimensions and levels of analysis, the results of this type of analysis provide salient information to the discussions of energy policy across the technical, economic and environmental domain.

Key words: Sustainability, Social Metabolism, Energy Metabolism, Primary energy source, energy systems, oil extraction, Ecuador.

ÍNDICE

Tabla de Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	4
RESUMEN.....	5
Resumen Español.....	5
Resumen Catalán	7
Resumen Inglés.....	9
ÍNDICE.....	12
Tabla de Contenido	12
Listado de Figuras.....	15
Listado de Tablas	17
ACRÓNIMOS Y TERMINOLOGÍA.....	18
INTRODUCCIÓN.....	19
Definición del problema y objetivos de investigación.....	19
Evolución de la tesis	21
Bosquejo específico de los capítulos y anexos	23
Actividades y publicaciones realizadas	26
CAPÍTULO I.....	28
1. MuSIASEM como herramienta emergente para comprender la sostenibilidad de los sistemas socioeconómicos y el suministro de energía.....	28
1.1. Resumen.....	28
1.2. Inclusión de la complejidad en los estudios de los sistemas de energía	28
1.3. Contribución de la Biofísica a la comprensión de la sostenibilidad	31
1.4. Metabolismo Social y MuSIASEM	34
1.5. Entendiendo los sistemas de energía a partir de la gramática MuSIASEM	35
1.5.1. Construcción de la gramática energética	37
1.6. Necesidad de estudiar el rendimiento de las fuentes primarias de energía fósil	40
1.7. Referencias.....	43
CAPÍTULO II.....	50

2. El metabolismo de la extracción de petróleo: un enfoque ascendente aplicado al caso de Ecuador	50
2.1. Resumen.....	50
2.2. Introducción	51
2.3. Antecedentes y revisión de la literatura	52
2.4. Materiales y metodología.....	56
2.4.1. MuSIASEM - Gramática energética- Procesadores	56
2.4.2. Elementos funcionales y estructurales de la extracción de petróleo	57
2.5. Obtención de datos.....	60
2.6. Resultados y discusión.....	61
2.6.1. Caracterizando el sistema energético de Ecuador al 2016	61
2.6.2. Construyendo una gramática ascendente.....	62
2.6.3. Escalado al procesador de extracción funcional general	66
2.6.4. Construcción de escenarios: Incremento de producción proyectado a 5 años	
70	
2.7. Discusión y conclusiones.....	74
2.8. Referencias.....	76
CAPÍTULO III	81
3. Explorando las implicaciones ambientales mientras envejecen los campos de petróleo mediante análisis relacional.....	81
3.1. Resumen.....	81
3.2. Introducción	82
3.3. Metodología: Implementación del análisis relacional para la extracción de petróleo	85
3.3.1. Conceptos básicos sobre el análisis relacional	85
3.3.2. Definición del procesador metabólico (a nivel de campo de petróleo)	86
3.3.3. Definición de gramáticas y diferentes lógicas de escalado	89
3.4. Obtención de datos.....	93
3.5. Resultados y discusión.....	94
3.5.1. Descripción general del sistema de extracción de petróleo (1972-2018). 94	
3.5.2. Identificación de puntos de referencia Benchmarks.....	97
3.5.3. Vista diacrónica a un nivel escogido	100
3.5.4. Vista sincrónica multinivel.....	101
3.5.5. Análisis multicriterio del rendimiento de los campos de petróleo	107

3.6.	Discusión y conclusiones	109
3.7.	Referencias.....	112
CAPÍTULO IV		118
4.	Comprendiendo el metabolismo futuro del sistema energético del Ecuador (ejercicio de construcción de escenarios a partir de los conceptos de la gramática MuSIASEM)118	
4.1.	Resumen.....	118
4.2.	Introducción	119
4.3.	Metodología.....	122
4.3.1.	Agotamiento de la producción de petróleo por tasas de declinación	123
4.3.2.	Cambio del rendimiento metabólico de los procesadores	124
4.3.3.	End use matrix	126
4.4.	Obtención de Datos.....	127
4.5.	Resultados y discusión.....	129
4.5.1.	Descripción de la situación energética del Ecuador al 2017	129
4.5.2.	Construcción de escenario de energía (2035).....	132
4.5.3.1.	Reducción de producción de petróleo (2035)	132
4.5.3.2.	Rendimiento del sistema de extracción (2035).....	134
4.5.3.3.	Demanda de energía (2035).....	136
4.5.3.	Gramática MuSIASEM 2035	137
4.6.	Discusión y conclusiones.....	142
4.7.	Referencias.....	144
CAPÍTULO V		147
5.	Conclusiones	147
ANEXOS.....		154
	Anexo 1: Información complementaria para el Capítulo III.....	154
	Anexo 2: Artículo publicado en la revista Science of the Total Environment	175
	Anexo 3: Artículo publicado en la Revista Energy Policy	176
	Anexo 4: Hoja de vida	177

Listado de Figuras

Figura 1-1: Gramática Energética.....	38
Figura 2-1: Patrón metabólico secuencial de los procesadores, desde la extracción de petróleo hasta los usos finales	57
Figura 2-2: Procesadores estructurales y funcionales del estudio de caso	60
Figura 2-3: Escalado de procesadores estructurales en funcionales.....	66
Figura 2-4: Escalado los procesadores funcionales a la extracción final de petróleo	67
Figura 2-5: Aumento del delta de producción de Ecuador en los próximos cinco años	71
Figura 2-6: Escalado de procesadores para el aumento del delta de producción	73
Figura 3-1: Representación de la extracción de petróleo a partir del procesador metabólico (función de producción biofísica extendida)	87
Figura 3-2: Ejemplos de diferentes lógicas de escalado de procesadores en el estudio de caso en Ecuador.....	90
Figura 3-3: Escalado geográfico del procesador que caracteriza el suministro de petróleo del Ecuador en un momento dado	91
Figura 3-4: Evolución en la explotación de campos petroleros en Ecuador durante el período 1972-2018.....	95
Figura 3-5: Cambios en las características del petróleo crudo extraído en Ecuador en el período 1972-2018.....	96
Figura 3-6: Comportamiento del contenido de BSW con el envejecimiento de los campos de petróleo	98
Figura 3-7: Algoritmos para generar puntos de referencia en los procesadores de campos petroleros por calidad API, antigüedad y contenido BSW	99
Figura 3-8: Vista diacrónica del metabolismo de la extracción de petróleo a nivel nacional que abarca el período 1975-2018.....	101
Figura 3-9: Una vista sincrónica multinivel a través de escalas geográficas de la red metabólica.....	102
Figura 3-10: Estructura de edad de los campos petroleros según la calidad del petróleo extraído (API: ligero, mediano y pesado).....	104
Figura 3-11: Ejemplo de visualización de criterios múltiples para proceso de explotación petrolera a nivel de campos	108
Figura 4-1: Declinación exponencial e hiperbólica en campos de petróleo	124

Figura 4-2: Cálculo de procesadores nacionales utilizando la demografía de campos petroleros – escenario al 2035	125
Figura 4-3 : Energy grammar “Sistema de Energía del Ecuador 2017”	131
Figura 4-4: Estimación de extracción de petróleo en Ecuador al 2035	133
Figura 4-5: Cambio de rendimiento en la extracción de petróleo a escala nacional proyectada al 2035	135
Figura 4-6: Cálculo de energy carrier (electricidad y combustibles) en el procesador nacional al 2035	136
Figura 4-7: Requerimientos de electricidad y fuel por composición socioeconómica al 2035	137
Figura 4-8: Sistema de energía del Ecuador al 2035	139
Figura 4-9: Emisiones de CO2	141

Listado de Tablas

Tabla 2-1: Clasificación del petróleo por gravedad API.....	58
Tabla 2-2: Categorización estructural basada en el uso de BSW	59
Tabla 2-3: Producción de PES y EC en Ecuador, 2015 (ktep)	61
Tabla 2-4: Matriz de uso final por tipo de combustible	62
Tabla 2-5: Bloques de extracción de Ecuador clasificados en función del tipo de petróleo extraído	62
Tabla 2-6: Ejemplos de flujos y fondos para tres procesadores estructurales. Las cifras pueden no coincidir debido al redondeo.....	64
Tabla 2-7: Construcción del procesador final de extracción de petróleo. Las cifras pueden no coincidir debido al redondeo	68
Tabla 2-8: Bloques identificados para cubrir el aumento del delta en la producción	72
Tabla 3-1: Estructura de edad de los campos petroleros por calidad de petróleo extraído (API: ligero, medio y pesado) y ubicación geográfica (prospectos)	105
Tabla 4-1: Portadores de energía netos (combustibles).....	130

ACRÓNIMOS Y TERMINOLOGÍA

- PES Primary Energy Sources
- EC Energy Carrier
- ES Energy System
- El Electricity
- Fu Fuel
- He Heat
- PC Power Capacity
- HA Human Activity
- HH Household
- LU Land Use
- TR Transport
- AF Agriculture & Fishing
- EM Energy & Mining
- SG Services & Government
- MC Manufacturing & Construction
- IN Industry
- EMR Energy Metabolic Rate
- Tep Toneladas equivalentes de petróleo
- ACV Análisis de ciclo de vida
- ACB Análisis costo beneficio
- EROI Energy return on investment
- API gravedad del Instituto Americano del Petróleo
- BSW Sedimento básico y agua
- GEI Gases de efecto invernadero

INTRODUCCIÓN

Definición del problema y objetivos de investigación

Es evidente el concepto de puntos máximos en la producción de petróleo de alta calidad y está reconocido la dinámica de los sistemas socioeconómicos hacia la extracción de reservas de petróleos no convencionales y de menor calidad. En el pasado era irreal pensar en la extracción del shale oil, fracking, extracción de petróleo en aguas profundas, petróleos extrapesados, arenas bituminosas, etc. no solo por las limitaciones tecnológicas, sino por la abundancia de recursos energéticos con mayores ventajas comparativas, sin embargo, ahora es común las inversiones en campos de petróleo con alta complejidad, pese a que su extracción y producción de energía intermedia y final demanda de elevados flujos de materiales y energía para su aprovechamiento.

Las pruebas tangibles de la degradación social y ambiental producto de la necesidad de consumo de energía y materiales para el sostenimiento del crecimiento económico de las sociedades, escalaron a varios paneles gubernamentales a escala mundial, lo cual decantó en la iniciativa climática para descarbonizar las economías, proponiendo la reducción de las emisiones de CO₂ para mantener los niveles de crecimiento de la temperatura global por debajo de 2 °C. De manera paralela los países apuestan por una atrevida iniciativa de sustitución parcial y total de las fuentes primarias de energía fósiles por recursos energéticos renovables, discurso que han acuñado varios actores de política energética, sin embargo, esta iniciativa aún sigue siendo poco efectiva en la práctica.

Los problemas de las bajas tasas de rendimiento energético que poseen las energías renovables es una de las principales complicaciones para materializar la sustitución de fuentes de energía de origen fósil. El cambio de paradigma hacia la renovabilidad de los sistemas energéticos, podría ser contraproducente, toda vez que se incrementaría la inversión de energía primaria y de materiales para entregar la misma cantidad de energía a la sociedad, lo cual en términos biofísicos intensificaría el agotamiento de las fuentes primarias de energía tradicional y los impactos ambientales conexos. Las inversiones en el desarrollo de fuentes de energía alternativas tendrán que competir por los recursos con otros sectores económicos, como la producción de alimentos y las manufacturas de bienes

y servicios que están directamente vinculados al mantenimiento del nivel de vida de las sociedades.

De acuerdo a los trabajos recientes de (Capellán-Pérez, 2019)¹, sobre “Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies”, se muestra que alcanzar altos niveles de penetración de las energías renovables en el sistema eléctrico global para el año 2060 de acuerdo con la narrativa del Crecimiento Verde, disminuiría las tasas de retorno energético EROI por sus siglas en inglés (Return on Energy Investment) de todo el sistema global de la actual ~12:1 a entre ~3 y 5:1 para mediados de siglo. Esto quiere decir que, en el momento más crítico de la transición, sólo se estarían obteniendo 3 unidades energéticas por cada unidad energética invertida, frente a las 12 obtenidas en el sistema actual.

Lo descrito puede ser la respuesta a la contradicción entre el discurso y lo que es viable en términos energéticos. Instituciones como la International Energy Agency IEA, The Institute of Energy Economics, Japan-IEEJ, World Energy Council-WEC, OPEP, BP y Greenpeace, pronostican escenarios en los cuales, pese a contemplar la reducción en las tasas de crecimiento del petróleo y combustibles en la matriz global de energía de uso final, su permanencia como energético principal continuará por lo menos en los próximos 15 años.

Los argumentos propuestos son parte de las dificultades que atraviesan los sistemas socioeconómicos para alcanzar la sostenibilidad, por tanto, una percepción holística en términos biofísicos puede ayudar a cerrar la brecha entre la comprensión de los procesos técnicos, políticos, sociales, económicos y ecológicos.

El propósito de esta Tesis es desarrollar herramientas analíticas capaces de ampliar el entendimiento de los problemas de sostenibilidad que atañe a los sistemas energéticos actuales, analizando a profundidad el rendimiento de la extracción de petróleo como fuente primaria de energía y su relación con la sociedad en la producción de energy carrier para garantizar las funciones requeridas del sistema, identificando sus limitaciones biofísicas en términos de escasez del recurso y sumidero ambiental.

¹ Capellán-Pérez, I., de Castro, C., Miguel González, L.J., 2019. Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews* 26, 100399.

Para guiar la investigación se propusieron las siguientes preguntas:

¿Es posible entender la sostenibilidad de los sistemas de energía y su relación con los sistemas socioeconómicos a partir de los análisis biofísicos?

¿Es posible desarrollar metodologías de contabilidad biofísica usando MuSIASEM para la comprensión del metabolismo de la fuente primaria de energía-petróleo?

¿Cómo cambia el rendimiento de los flujos y fondos biofísicos en la extracción de petróleo, mientras envejecen los campos de petróleo?

¿Cómo cambia la presión ambiental con el deterioro de la extracción de petróleo?

¿Es posible construir escenarios futuros en los sistemas energéticos a partir de metodologías de contabilidad biofísicas?

Responder estas preguntas implica aumentar la utilidad del conocimiento científico existente para generar análisis biofísicos integrados relevantes que permitan informar las discusiones en el uso sostenible de los recursos y el futuro de las fuentes de energía primaria dentro de los sistemas socioeconómicos.

Evolución de la tesis

Esta tesis presenta una recopilación de varios trabajos de investigación en términos biofísicos, sobre el entendimiento de los problemas de sostenibilidad que atañe a los sistemas energéticos, sesgando el trabajo hacia el desempeño metabólico del sistema de extracción del petróleo como fuente primaria de energía. Este proyecto comenzó a materializarse en el 2015, año en el que inicié con los estudios formales del PhD.

Por mi formación previa de Ingeniero de Petróleos y estudios sobre política y gobernanza de la energía mi interés fue aplicar los principios de MuSIASEM para adaptarlos al entendimiento de los procesos de extracción de petróleo y su relación con la sociedad para garantizar las funciones requeridas de los sistemas socioeconómicos, considerando las restricciones biofísicas y el estudio de sus impactos ambientales y sociales, para luego generar discusiones más profundas que puedan derivar en propuestas de política energética.

En el primer año realicé la revisión bibliográfica de la metodología Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism-MuSIASEM, con ello fue necesario

comenzar a manejar conceptos de complejidad, economía biofísica, metabolismo de las sociedades, teoría de la jerarquía, entre otros conceptos y partes de la ciencia que conllevan el entendimiento de MuSIASEM como una herramienta emergente para tratar los problemas de sostenibilidad. Mientras afianzaba los conocimientos, participé en congresos a nivel nacional e internacional sobre estudios energéticos.

En el segundo año estructuré una gramática energética, necesaria para recabar la información de campo sobre el sistema de extracción del Ecuador, sin embargo, en el transcurso de este período, me di cuenta que este era el principal problema para avanzar con mi investigación. Para ello gestioné la recopilación de información primaria en campos petroleros y recabé información estadística de varias instituciones de gobierno y empresas privadas que no se encontraban disponibles en ese momento, sin embargo, esto retrasó la consecución de las actividades programadas, solicitando dos prórrogas de tiempo al Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals ICTA para poder cumplir con los objetivos planificados.

En el tercer año, se consolidó el desarrollo metodológico para entender el metabolismo de la extracción de petróleo basado en la distinción entre elementos funcionales y estructurales, para generar un diagnóstico con el método de escalonamiento de abajo hacia arriba y se consolidó su aplicación al sistema de extracción del Ecuador. Se publicó un artículo científico de alto impacto en la revista Energy Policy (capítulo 2).

El cuarto año, fue el de mayor éxito en términos de información relevante. Se logró la construcción de una gran base de datos en términos biofísicos de más de 130 mil datos para entender el rendimiento del sistema de extracción de petróleo del Ecuador, en 46 años de producción. Esto permitió entender los cambios en la presión ambiental basados en el suministro de recursos (disponibilidad y calidad de los recursos) y requisitos de sumidero (capacidad de absorción de desechos y emisiones de GEI).

En el quinto año se materializaron dos artículos científicos adicionales i) sobre las implicaciones ambientales del envejecimiento de las reservas convencionales de petróleo con análisis relacional entre elementos funcionales (nocionales) y estructurales (tangibles) en la red metabólica, lo que permite una caracterización y geolocalización simultánea del proceso de explotación de petróleo a través de diferentes escalas y

dimensiones. Este artículo fue publicado en STOTEN, revista de alto impacto (capítulo 3) y ii) sobre la provisión futura de flujos en el sistema de energía del Ecuador, escenario construido a partir de la comprensión biofísica y el uso de las tasas metabólicas en la matriz de uso final de energía (capítulo 4).

Finalmente, puedo decir que los objetivos planteados al inicio del programa de PhD se cumplieron con éxito, además ahora se cuenta con una base sólida de información para continuar con las investigaciones y generar aportes científicos en el entendimiento de la sostenibilidad de los sistemas de energía.

Bosquejo específico de los capítulos y anexos

La estructura de esta tesis parte de la discusión de sostenibilidad en la relación de los sistemas socioeconómicos y los ecosistemas, en donde los flujos de energía, materiales y los servicios ambientales son fundamentales para mantener la salud de los sistemas. La provisión de energía depende de la dinámica de flujos en la red metabólica de energía y a la vez esta se encuentra condicionada al tamaño y tipo de la fuente primaria de energía para garantizar el aprovisionamiento de energy carrier intermedios y finales en los sistemas socioeconómicos.

En el capítulo I se propone la comprensión teórica de MuSIASEM como herramienta emergente en las discusiones de sostenibilidad para la provisión de energía en los sistemas socioeconómicos. En el capítulo II, se formaliza la metodología para entender el metabolismo de la extracción de petróleo como fuente primaria de energía, basado en la distinción entre elementos funcionales y estructurales, para generar un diagnóstico del rendimiento de la extracción de petróleo de manera ascendente. En el capítulo III, se presenta un estudio metodológico y aplicación empírica sobre las implicaciones ambientales del envejecimiento de las reservas convencionales de petróleo con análisis relacional, combinando elementos funcionales (nocionales) y estructurales (tangibles) en la red metabólica, lo que permite una caracterización y geolocalización simultánea del proceso de explotación de petróleo a través de diferentes escalas y dimensiones. En el capítulo IV se presenta un trabajo de construcción de escenarios futuros de flujos de energía centrando el análisis en un período de 15 años para el sistema energético del Ecuador. Se basa en el entendimiento metabólico de la fuente primaria de energía-

petróleo y las tasas metabólicas en la matriz de uso final, para luego discutir en términos de política pública la salud del sistema analizando la relación de escasez y sumidero ambiental. Finalmente, en el capítulo V se realiza las conclusiones acordes a las preguntas y resultados de la investigación.

Capítulo I

En este capítulo se realiza una revisión histórica sobre la inclusión de los principios propios de la complejidad en los análisis de energía y luego se estudia la importancia de los trabajos biofísicos y el metabolismo de la sociedad como parte fundamental para entender la sostenibilidad. Finalmente se aborda MuSIASEM como una herramienta que aglutina varias disciplinas de la ciencia como: La complejidad, economía biofísica, teoría de la jerarquía, teoría postnormal, entre otras, que permiten el entendimiento de la relación entre la sociedad y la naturaleza a través del intercambio de flujos de materiales y energía, además permite estudiar el rendimiento de la extracción de petróleo como fuente primaria de energía, necesaria para garantizar el suministro de energy carrier y con ello la permanencia de los sistemas socioeconómicos.

Capítulo II

El objetivo de este capítulo es doble: por un lado, se evidencia que el sistema energético mundial depende en gran medida de los combustibles fósiles y se formaliza una metodología para entender el metabolismo de la extracción de petróleo como fuente primaria de energía, basado en la distinción entre elementos funcionales y estructurales, para generar un diagnóstico del rendimiento de la extracción de petróleo de abajo hacia arriba, utilizando los principios de MuSIASEM; por el otro, aplicar la metodología al caso de Ecuador, caracterizando los factores que determinan el metabolismo en el 2016 y desarrollando un escenario y acercamientos a la generación de políticas futuras. Se muestra cómo se construye la gramática de extracción de petróleo a través de un enfoque ascendente y se ilustra un escenario de extracción de petróleo futura, mostrando cómo se puede aplicar la gramática modular ascendente para verificar las restricciones en los estados futuros.

Capítulo III

De igual forma que en el capítulo II, este apartado presenta un trabajo de metodología y de aplicación. Se muestra un estudio metodológico alternativo al energy return on investment EROI para evaluar el rendimiento de la explotación de las fuentes primarias de energía disponibles y potenciales, basándose en la misma lógica del análisis de energía neta, pero implementado con análisis relacional entre elementos funcionales (nocionales) y estructurales (tangibles) en la red metabólica mientras envejecen los campos de petróleo, lo que permite entender entre otros aspectos, el comportamiento en el tiempo de las limitaciones biofísicas de escasez del recurso y su cambio de calidad, además permite entender de mejor manera las implicaciones ambientales en términos de suministro de recursos y sumidero neto de energía, emisión de GHG y eliminación de agua contaminada. Para mostrar las bondades de este trabajo se realizó la aplicación al sistema de extracción del Ecuador entendiendo su rendimiento en el período 1972-2018, a partir de análisis diacrónico y sincrónico y finalmente se propone un estudio multicriterio para enriquecer la discusión en aspectos técnicos, económicos y ambientales.

Capítulo IV

Se presenta una alternativa para estudiar el rendimiento futuro de los sistemas de energía del presente, a partir de la construcción de escenarios, entendiendo la dinámica metabólica de escasez de la fuente primaria de energía (metodología desarrollada en los capítulos II y III) y de las necesidades energéticas de los subsistemas socioeconómicos dado por las tasas metabólicas exosomáticas de la matriz de uso final en la gramática MuSIASEM. Este trabajo debe tomarse como una aproximación a la disponibilidad y a la necesidad de energía del sistema socioeconómico del Ecuador al 2035, con lo cual permite discutir en términos de política pública la salud del sistema y observar entradas y salidas de flujos primarios, intermedios y finales de energía y la presión ambiental inherente al sistema.

Capítulo V

En este capítulo se exponen las conclusiones identificadas de la investigación, realizada en los capítulos anteriores y basado en las preguntas de investigación que propiciaron la realización de esta tesis. Por un lado, se presentan los resultados obtenidos en términos metodológicos y por el otro las principales propuestas de política pública enfocados al

sistema de energía en Ecuador. También se realizan varias recomendaciones a tener en cuenta para trabajos futuros y para la los actores responsables de la política energética.

Actividades y publicaciones realizadas

a) Participación en conferencias internacionales

- Participación en el Seminario Internacional de Innovación y Retos Tecnológicos del Sector Energético en la 4ta Revolución Industrial
Quito/Ecuador, 2019
Presentación oral
- IV International congress of science, technology and environmental enigneering (IV ICSTEE 2019)
Riobamba/Ecuador, 2019
Presentación oral
- Participación en 15va Congreso de la Sociedad Internacional de Economía Ecológica
Puebla/México, 2018
Presentación oral
- Participation en 9th Biennial International Workshop Advances in Energy Studies.
Energy and Urban Systems
Stockholm/Sweden, 2015
Presentación oral y poster

b) Libros de congresos

- Análisis del sistema de extracción de petróleo a partir del uso de la tasa de retorno energético TRE, para el caso del Ecuador
Book: Ecological Economics and Social-Ecological Movements. Science, policy and challenges to global processes in a troubled word
ISBN: 978-607-28-1611-4
Puebla/México, 2019
- Evaluation of energy metabolism in the oil extraction in Ecuador from the application of Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM)
Book: 10 Biennial International Workshop Advances in Energy Studies. Energy futures, environment and well-being

ISBN (e-book): 978-3-85125-395-5

Napoles/Italy, 2017

- Energy consumption in the oil extraction system of Ecuador

Book: 9th Biennial International Workshop Advances in Energy Studies. Energy and Urban Systems

ISBN: 978-3-85125-395-5

Stockholm/Sweden, 2015.

c) Publicaciones en revistas de alto impacto

- Parra, R., Bukkens, S., Giampietro, M., (2020). Exploration of the environmental implications of ageing conventional oil reserves with relational analysis. *Science of the Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142371>
- Parra, R., Di Felice, L. J., Giampietro, M., & Ramos-Martin, J. (2018). The metabolism of oil extraction: A bottom-up approach applied to the case of Ecuador. *Energy Policy*, 122(July), 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.017>

Capítulo I

MuSIASEM como herramienta emergente para comprender la sostenibilidad de los sistemas socioeconómicos y el suministro de energía

1.1. Resumen

En este capítulo se realiza una revisión histórica sobre la inclusión de los principios propios de la complejidad en los análisis de energía, para luego pasar a estudiar la importancia de los estudios biofísicos y el metabolismo de la sociedad como parte fundamental para entender la sostenibilidad. Finalmente se aborda MuSIASEM como una herramienta que aglutina varias disciplinas de la ciencia como: La complejidad, economía biofísica, teoría de la jerarquía, teoría postnormal, entre otras, que permiten el entendimiento de la relación entre la sociedad y la naturaleza a través del intercambio de flujos de materiales y energía, además permite estudiar el rendimiento de la extracción de petróleo como fuente primaria de energía, necesaria para garantizar el suministro de energy carrier y con ello la permanencia de los sistemas socioeconómicos.

1.2. Inclusión de la complejidad en los estudios de los sistemas de energía

La rápida transformación en la composición de los sistemas de energía basados en el constante crecimiento de la demanda en los sectores de consumo, la disponibilidad de infraestructura de transformación y el agotamiento de las fuentes primarias de energía tradicional, sumado a la necesidad climática global para descarbonizar las economías, generan una alerta sobre la sostenibilidad en la interacción de las sociedades humanas, los sistemas económicos y los ecosistemas. Mejorar el entendimiento de las sociedades sobre los sistemas de energía y su relación con el entorno conlleva a dejar de lado los

modelos de análisis tradicionales basados en la linealidad, para adoptar un enfoque de pensamiento de sistemas complejos.

En el siglo XIX, con la aparición de la máquina de vapor, el desarrollo de los principios de termodinámica clásica proporcionó un marco sistémico para estudiar conjuntos de transformaciones de formas de energía, combinadas para generar trabajo útil. Aunque los sistemas de energía fueron estudiados como elementos mecánicos con modelamientos adimensionales y aislados en el tiempo, particularidad que no es coherente con los sistemas reales de energía. Con el apareamiento de una segunda postura derivada de la termodinámica del no equilibrio en 1960 se acuñó los principios para el entendimiento energético en las sociedades humanas, sin embargo, todavía su enfoque dejó de lado principios de autoregulación, límites difusos y diferenciación de escalas, propios de la teoría de la complejidad, por lo cual las evaluaciones energéticas no dieron los resultados esperados en la comunidad científica (Giampietro et al., 2012).

En la década de 1970 varios autores desarrollaron enfoques no tradicionales basados en los sistemas complejos para generar análisis sistémicos de los flujos de energía dentro de los sistemas ecológicos y socioeconómicos (Odum, 1971; 1983; 1996; Georgescu-Roegen, 1966, 1975, 1976 y Pimentel, 1979, 1980). Un sistema complejo es aquel que nos permite estudiar y descifrar el comportamiento de varios de los subsistemas, es decir es la descripción del sistema en base a la elección de determinadas propiedades o cualidades que dependerá totalmente de la forma como deseamos interactuar con el sistema (Rosen, 1977). La interacción de los sistemas humanos y económicos en el entorno pueden verse como sistemas complejos abiertos disipativos ya que existe un constante intercambio de materia y energía para el mantenimiento de su relación y cuya abstracción de la realidad dependerá del sistema y del contexto (Schneider y Kay 1994; Giampietro et al., 2011).

De acuerdo al análisis realizado por Diaz en el 2013, la complejidad se asocia a la necesidad de usar dominios descriptivos simultáneos no equivalentes (Neurath, 1946) que reflejan el uso simultáneo de múltiples escalas para su observación y representación, es decir son sistemas que permiten al observador discernir tantos subsistemas como sea necesario dependiendo de la escala o conjunto de escalas elegidas para la representación (Simon, 1962; Koestler, 1968; Pattee (ed.), 1973; Salthe, 1985; O'Neill et al., 1986; O'Neill, 1989; Giampietro, 2003; Giampietro et al., 2011). Los subsistemas son vistos

bajo la teoría de la jerarquía, como "holones" que operan dentro de un sistema mayor denominado "holarquía". El concepto de "holón" fue introducido por Koestler (1967) para abordar la existencia de una relación evasiva entre elementos estructurales y funcionales que operan en sistemas adaptativos complejos (Giampietro et al., 2006). La teoría de la jerarquía (Allen y Starr, 1982), tiene implicaciones epistemológicas de los niveles múltiples de las organizaciones, lo que se traduce en la necesidad de usar simultáneamente diferentes escalas para la comprensión de los fenómenos.

Esto puede explicarse fácilmente en términos semánticos: si se observa a un ser humano en un determinado nivel de observación, se verá un conjunto de atributos que expresa las funciones humanas. En este nivel no se diferencia sus órganos. Si se observa el hígado de esa persona en un nivel de observación más bajo, se diferenciará el estado superficial del hígado, pero no se verá los tejidos y los sub-órganos. La persona observada podría ser un oficial que regula el tránsito o una madre, a la vez la representación de este elemento estructural estará asociado con un conjunto completo de aspectos relevantes diferentes, si la persona es observada por un conductor o su hijo. No solo un holón es al mismo tiempo un todo formado por partes más pequeñas y una parte de un todo mayor, sino que su significado depende del nivel de organización en el que lo percibimos. Se puede observar a cualquier elemento estructural de la holarquía expresar diferentes funciones dependiendo del propósito de la observación (Giampietro et al. 2006).

De hecho, aunque la complejidad de los sistemas puede verse como un atributo general de cualquier sistema vivo, los criterios y cualidades elegidas de manera jerárquica sobre un fenómeno de la realidad será siempre determinado por el investigador, es decir que la observación es una representación flexible y limitada a un punto de vista del observador.

La complejidad entonces se la puede mirar desde la economía biofísica como una forma de entendimiento de los fenómenos que se presentan entre el desenvolvimiento de los sistemas socioeconómicos y los ecosistemas a diferentes niveles y escalas (Georgescu-Roegen, 1971), pese a que la introducción de los análisis biofísicos se generaron de manera temprana originalmente acuñado por Lotka (1924) para ayudar al análisis económico convencional, a través de la integración de aspectos de la biología y la física fundamentales (Cleveland, 1999), no es, sino hasta la crisis epistemológica del reduccionismo en los años noventa que esta postura tomó fuerza debido a la necesidad

desesperada de generar herramientas innovadoras capaces de analizar las interacciones sociedad-ambiente desde una perspectiva biofísica (Fischer-Kowalski, 1998; Giampietro, 2000a y 2000b; Martinez-Alier, 1987).

1.3. Contribución de la Biofísica a la comprensión de la sostenibilidad

De acuerdo a la abstracción de los principios de sostenibilidad realizado por Cadillo en el 2015, la perspectiva de linealidad en los estudios ambientales tradicionales abordan los problemas de interacción entre el ser humano y los ecosistemas como predecibles y controlables, y se cree que se lo puede manejar estos elementos en esferas diferenciadas, por un lado la acción misma del ser humano y por otro las afectaciones a los ecosistema, errores notados por Folke en los análisis de sostenibilidad (Folke et al., 2002), y a la vez se propone un enfoque en donde la sociedad y los sistemas naturales mantengan el mismo peso, denominándolos sistemas socioecológicos.

En la misma línea, Daly concibe a la sostenibilidad dentro de varios aspectos biofísicos contemplando que la tasa de uso de los recursos renovables no debe exceder la tasa de regeneración, la tasa de generación de desechos no debe exceder la capacidad de asimilación y finalmente propone que el agotamiento de los recursos no renovables debería propiciar su sustitución por recursos renovables (Daly, 1992).

Varios investigadores mantienen la discusión del concepto de sostenibilidad bajo dos paradigmas, a) sostenibilidad *débil*: la acción del ser humano es protagónica y es capaz de regenerar los recursos naturales y servicios ambientales y b) *sostenibilidad fuerte*: las funciones ecológicas brindadas por la biósfera no pueden ser reproducidas en la tecnosfera por el control del ser humano (Martinez-Alier, 1995; Turner, 1992). Por ejemplo el ciclo del agua usa 35.000-44.000 terawatts de energía solar por lo cual no puede ser controlado por la tecnología del ser humano que controla 16 terawatts de energía (Giampietro, 2013).

Desde la narrativa biofísica, la sostenibilidad estudia la interacción de los modelos socioeconómicos y los ecosistemas, para lo cual es necesario comprender el funcionamiento de los sistemas humanos en el cual un rendimiento sostenido de materiales y energía proveniente de los ecosistemas hace posible que las sociedades

humanas evolucionen, transformando y usando los sistemas económicos para garantizar la reproducción de las sociedades (Giampietro et al., 2012).

Las sociedades humanas se consideran sistemas metabólicos (Wolman, 1965; Broto et al., 2012) que muestran su apariencia a partir de estructuras disipativas (Dyke, 1988; Allen, 1997). Estos sistemas pueden expresar una identidad que los distingue de su contexto, pero al mismo tiempo dependen y alteran las características de su entorno para expresar esta identidad. Un sistema disipativo es necesariamente un sistema abierto, cuyo proceso metabólico se traduce en un consumo continuo de insumos útiles y producción de desechos inútiles para reproducir sus elementos estructurales y realizar las funciones requeridas. En este proceso, las mismas actividades que sustentan la existencia del sistema metabólico destruyen el entorno favorable del que dependen (Giampietro & Funtowicz, 2020).

Los principios termodinámicos se han utilizado para explicar la autoorganización de los sistemas vivos incluidos los ecosistemas (biología) y también para explicar el funcionamiento de los seres humanos en las sociedades (antropología y sociología). Una integración de estas posturas llevó a la creación y uso del término “sistemas socioecológicos” acuñados explícitamente en los análisis de sostenibilidad (Gunderson & Holling, 2002; Holling, 2001; Berkes et al., 1998 y 2003; Folke et al., 2010; Ostrom, 2009). Un sistema socioecológico se define como un sistema complejo de componentes estructurales y funcionales que operan dentro de un límite prescrito, controlado de manera integrada por las actividades expresadas por un conjunto dado de ecosistemas (en la biosfera) y un conjunto dado de actores sociales e instituciones (en la tecnosfera) (Giampietro, 2018).

Por lo tanto, los sistemas socioecológicos se consideran sistemas abiertos en donde existe intercambio de flujos de entrada y salida con su entorno, dependen de su contexto para mantener su nivel actual de actividad y tamaño del factor de producción. Estos sistemas deben ser adaptativos y anticipatorios para sobrevivir en tiempo debido a que su espacio de opciones está limitado por procesos fuera de control (Giampietro, 2019).

La comprensión de las limitaciones biofísicas es de vital importancia para entender las implicaciones de la sostenibilidad, en donde los sistemas sociales y económicos son

sistemas disipativos abiertos en interacción continua con los ecosistemas e inmersos en un sistema cerrado más amplio denominado tierra con limitaciones naturales que está obligado a reciclar materia y flujos.

El constante crecimiento económico de las sociedades modernas por la demanda de bienes y productos conlleva a la extracción de recursos naturales (materiales y energía) a un ritmo sin valoración, lo cual es eminentemente peligroso ya que no se toma en cuenta el lapso de tiempo de reducción de los stocks para comprender el horizonte de escasez. De igual forma la acción de extracción a tasas no controladas también conlleva al incremento en la presión de los ecosistemas que actúan como sumideros para la recolección de los flujos en forma de residuos.

Pero no solo existen limitantes externas, sino también restricciones metabólicas internas del sistema lo cual está dado por la tipología de las organizaciones en los modelos socioeconómicos, en los cuales se distribuyen de manera selectiva los recursos naturales para la producción de bienes y servicios que finalmente son consumidos por las sociedades. Mostrando una analogía con el metabolismo del cuerpo humano, las restricciones externas se asocian a la disponibilidad de alimentos, mientras que las restricciones internas pueden asociarse con la necesidad de preservar la integridad y la funcionalidad de los órganos individuales que proporcionan vitalidad al cuerpo humano (Giampietro et al., 2012).

La recolección, depuración y análisis de información adicional que brinda los estudios biofísicos ayudan a la comprensión de la sostenibilidad a partir de la interacción de los sistemas socioeconómicos con los sistemas ecológicos considerando las limitaciones naturales del entorno y las restricciones internas del sistema. Los análisis biofísicos revelan hechos basados en realidades físicas asociadas con los requisitos materiales y energéticos de procesos de producción y consumo que determinan las funciones expresadas por un sistema socioeconómico (Cleveland, 1999; Giampietro et al., 2012).

1.4. Metabolismo Social y MuSIASEM

MuSIASEM es una herramienta metodológica que permite analizar de manera cualitativa y cuantitativa varios fenómenos, vinculando variables socioeconómicas y biofísicas de manera integrada. Se basa en el marco conceptual de *metabolismo social* que define la relación entre la sociedad y la naturaleza a través del intercambio de flujos de materiales y energía que entran y salen de acuerdo a la intensidad de las relaciones entre los sistemas (Fisher-Kowalski, 1997).

Los procesos metabólicos sociales comienzan con la apropiación de materiales y energía por parte de los seres humanos, los cuales pueden ser transformados y circulados para ser consumidos y finalmente son expulsados a la naturaleza. Cada uno de estos procesos tiene un impacto económico y ambiental diferente dependiendo de: a) la manera en la que se realizan las relaciones, b) tamaño de los flujos de materiales y energía implicados, c) área donde se produce el fenómeno, d) tiempo disponible y e) la capacidad de regeneración de la naturaleza (Gonzales de Molina y Toledo, 2014).

Un sistema metabólico es cualquier sistema capaz de utilizar energía e insumos materiales para mantener, reproducir y adaptar su identidad estructural y funcional, para lo cual se puede descifrar y predecir un patrón metabólico asociado con la producción y el consumo de bienes y servicios en cada tipología de los sistemas socioeconómicos. Para que el sistema social se reproduzca y permanezca funcionando, se requiere el metabolismo continuo de los flujos de materiales y energía en los componentes estructurales y funcionales de la sociedad, (Giampietro, et al., 2012).

MuSIASEM integra otros conceptos teóricos de distintas disciplinas científicas, tales como la termodinámica del no-equilibrio aplicada al análisis ecológico (Odum, 1996, 1983, 1971; Ulanowicz, 1995, 1986), la teoría de los sistemas complejos (Kaufmann, 1993; Morowitz, 1979; Rosen, 2000; Zipf, 1941) y la bioeconomía, según los criterios de (Georgescu-Roegen, 1971). Precisamente, este enfoque ha sido desarrollado para hacer frente al desafío epistemológico de percibir y representar procesos que ocurren a través de diferentes escalas y analizar la viabilidad, factibilidad y deseabilidad de los patrones metabólicos en las sociedades humanas (para mayor comprensión referirse a los estudios de Giampietro y Mayumi 1997, 2000b; Giampietro et al., 2012).

En síntesis, MuSIASEM es un esquema contable que permite la vinculación de variables biofísicas y socioeconómicas de manera integrada. Esto hace posible unir dos puntos de vista no equivalentes del patrón metabólico de una sociedad dada: a) el punto de vista externo que trata las posibles limitaciones ambientales, como la disponibilidad de recursos y la capacidad de absorción de residuos (factibilidad del patrón metabólico de acuerdo con las características de procesos fuera del control humano); y b) la visión interna que se ocupa de posibles limitaciones técnicas y económicas, como los coeficientes técnicos y la exigencia de factores de producción (viabilidad del patrón metabólico de acuerdo con las características de los procesos bajo control humano).

1.5. Entendiendo los sistemas de energía a partir de la gramática MuSIASEM

Para la explicación de la concepción de la gramática MuSIASEM y su visualización para el sector energético, tomaré parte de la investigación que realizamos en el Centro de Prospectiva Estratégica del Ecuador-CEPROEC en el 2015. La gramática MuSIASEM se define como un conjunto de relaciones que se establecen entre categorías semánticas y categorías formales, previamente definidas, con la finalidad de obtener una representación capaz de ser operacionalizada. La organización coherente de estas categorías semánticas facilita diversas operaciones cognitivas, como por ejemplo, la de atribuir característica o propiedades a objetos que no conocemos, establecer relaciones entre objetos, hacer inferencias, etc., (Giampietro et al., 2012).

La gramática MuSIASEM parte de la noción de narrativa, es decir que refleja un significado a partir de la experiencia y no pretende, en ningún momento, ser una consideración objetiva de la realidad. De este modo, la gramática funciona como un medio de construcción que permite transmitir una experiencia entre un narrador y un oyente. Ello implica que el narrador realice, previamente, una elección acerca de lo que es relevante de la realidad (apreciación subjetiva), imponiendo así una identidad al sistema en observación e infiriendo una relación causal entre eventos (Giampietro et al., 2012). En consecuencia, se puede decir que la gramática rompe la concepción de entender

totalmente la realidad, tal como lo intentan los modelos, y en su lugar proporciona una interpretación de la realidad.

El enfoque adopta el modelo de flujo y fondo propuesto por Georgescu-Roegen (1971). La distinción entre fondo y flujo es fundamental para comprender la forma de funcionamiento de los sistemas y su sostenibilidad en el tiempo. Las categorías de flujo son aquellos elementos que entran, pero no salen de la representación del sistema o salen sin haber ingresado. Por ejemplo: la energía fósil. En cambio, las categorías de fondos son aquellos agentes que preservan su identidad durante las representaciones y transforman los flujos de entrada en flujos de salida, por ejemplo, la actividad humana o la tierra ricardiana. Los fondos son elementos cuya identidad permanece intacta sobre la escala de análisis espacial y temporal elegida, deben mantenerse para poder metabolizar los flujos. Bajo esta distinción es posible analizar el consumo total de energía en diferentes sectores de las economías modernas. Una descripción detallada sobre la importancia de definir fondos, flujos y relaciones fondo/flujo para MuSIASEM se puede encontrar en (Giampietro et al. 2013).

La interacción entre el sistema y su entorno hace que los sistemas vivos sean sistemas abiertos, porque necesitan un aporte continuo de materiales y energía para compensar la disipación que ocurren en los procesos de autoorganización. Por este motivo, Prigogine (1961, 1978) denominó a este tipo de sistemas como sistemas disipativos. El punto relevante de estos sistemas disipativos es que las interacciones no lineales, que se dan entre las diferentes escalas y niveles, pueden promover el surgimiento de la capacidad del sistema para regenerarse a niveles superiores de autoorganización, como una respuesta a las demandas del entorno (Gómez Marín, 2002).

La metodología permite organizar la información de los sub compartimientos de manera jerárquica con lo cual se puede operar simultáneamente en diferentes niveles de organización del sistema socioeconómico. Los compartimientos de los niveles menores pueden combinarse a partir de una caracterización específica para anidarse en una entidad de nivel superior. La operación de un sistema anidado de este tipo requiere una interacción constante de los diversos componentes a través de escalas y niveles de organización.

Finalmente, se puede ver una gramática como un conjunto de relaciones que vinculan categorías formales con categorías semánticas. Esto significa que los datos, en este caso referidos a la energía, se organizan de una manera que tenga sentido de las relaciones esperadas en un todo funcional, vinculando elementos que operan en diferentes niveles del sistema y manteniendo distinciones cruciales entre los componentes que juegan diferentes funciones.

1.5.1. Construcción de la gramática energética

La energía es un recurso esencial para la existencia, permanencia y desarrollo de cualquier sociedad humana, por lo cual la sostenibilidad involucra tener en cuenta la visión interna (metabolismo de los compartimientos socioeconómicos) y externa (limitaciones biofísicas) del sistema. El proceso de autoorganización de las sociedades se asocia con la expresión de un patrón metabólico determinado por la disponibilidad de energía y materiales y la capacidad de la sociedad para controlar y transformar estos flujos.

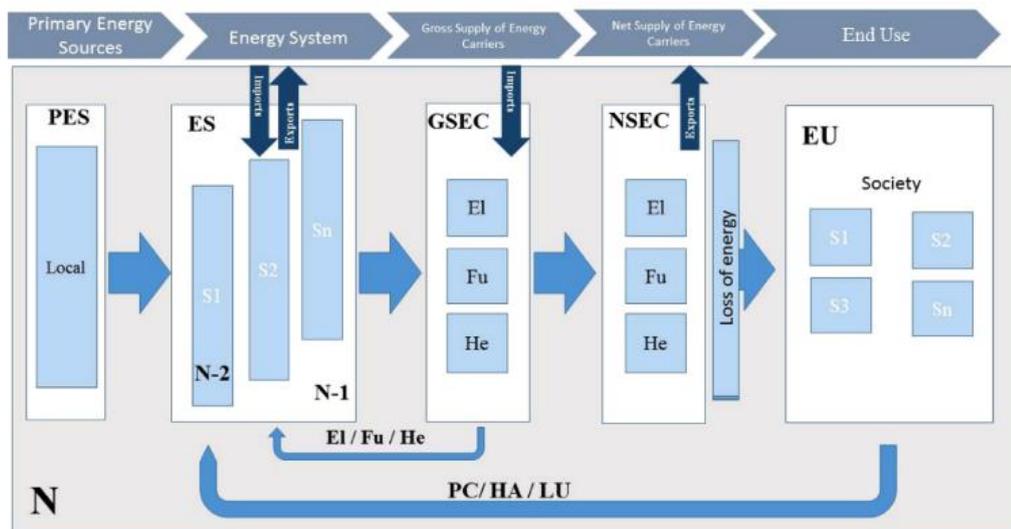
El entendimiento del sistema energético se traduce a la comprensión de a) disponibilidad de las fuentes primarias de energía y la calidad del recurso b) acceso a capacidad tecnológica para su transformación, c) conocimiento del tamaño de la demanda final de energía secundaria en los subsectores económicos y d) los impactos al entorno que conlleva el aprovechamiento del recurso.

La construcción de la gramática MuSIASEM puede proporcionar una idea clara de los procesos que están involucrados en la obtención de la energía para el uso final en las sociedades, así como también la eficiencia de los procesos, incluye la representación del hiperciclo o bucles que sugieren procesos acoplados, de tal forma que se contabiliza la energía secundaria que es necesaria para producir más energía secundaria (en la explotación de energía primaria) y la relación de otros flujos y fondos que se metabolizan en diferentes niveles del sistema. Este análisis permite identificar no solo el rendimiento técnico del sistema a diferentes escalas y niveles, sino también cuantifica el impacto ambiental y su viabilidad económica.

La representación de la gramática del sistema energético se basa en la conjunción de varias categorías semánticas que establecen como los diferentes procesos de generación

de energía (producción de combustibles, generación de electricidad, producción de calor, etc.) a partir de su metabolismo, determinan categorías formales que sirven para realizar una cuantificación relativa (volumen de combustible, cantidad de electricidad, intensidad de calor, etc), bajo un conjunto dado de reglas de producción (coeficientes técnicos que determinan las transformaciones). Para una descripción más detallada véase Giampietro et al., 2011, Cap. 6 y Giampietro et al., 2012, Cap. 9 y 10.

Figura 1-1: Gramática Energética



Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

Existen varios elementos fundamentales a considerar para la aplicabilidad de la gramática:

- a) Primary energy sources -PES: son formas de energía requeridas por el sistema energético para generar el suministro de portadores de energía utilizados por las sociedades. De acuerdo con las leyes de la termodinámica, las fuentes de energía primaria (PES) no se pueden producir y se encuentran en la biosfera en su forma biofísica original (carbón, gas, petróleo, viento, agua, sol y biomasa).
- b) Energy Carriers -EC: los portadores de energía son producidos por el sistema de energía de una sociedad a partir de la entrada de las fuentes de energía primaria. Cuando se refiere a un portador de energía implica un costo de energía para su producción. Los EC son los combustibles, electricidad y calor. Es importante tener en cuenta la diferenciación entre energía mecánica (electricidad) y energía térmica (calor y

combustibles), es por esto que en la contabilidad de energía se la expresa como vector y no como un todo durante el proceso, es decir se respetan las especificidades de cada energy carrier.

c) Energy end uses-EU esta expresión se refiere a las tareas útiles y/o trabajos que se realizan por los diversos sectores de la sociedad al convertir los portadores de energía en energía utilizada para realizar tareas útiles (Giampietro et al., 2012).

En esta representación existen flujos de PES y/o EC que entran o salen en los diferentes niveles para garantizar el equilibrio del sistema. La diferenciación de fondos y flujos utilizados en la descripción preanalítica es esencial para generar la contabilidad. Recapitulando, los fondos son elementos cuya identidad permanece intacta sobre la escala de análisis espacial y temporal elegida, mientras que los flujos son elementos que ingresan al sistema sin existir o salen de él sin ingresar.

Es necesario mantener los fondos para poder metabolizar los flujos, y la contabilidad de los fondos es una de las contribuciones esenciales de MuSIASEM; de hecho, muchas formas de contabilidad de materiales y energía solo consideran los flujos y no consideran la importancia clave de caracterizar los fondos necesarios para reproducir y / o usar dichos flujos. En la gramática, el uso de la tierra, la actividad humana y la capacidad de energía (tecnología) son ejemplos de fondos, mientras que la electricidad producida y consumida, el agua consumida y los combustibles consumidos y producidos, así como el petróleo extraído, son ejemplos de flujos.

Existen otros conceptos derivados de la gramática MuSIASEM como “ruta secuencial metabólica” (metabolic pathway) y los “procesadores metabólicos” (metabolic processors) que actúan bajo elementos estructurales y funcionales del sistema, mismos que serán desarrollados en el próximo capítulo para generar el entendimiento metabólico del sistema de extracción de petróleo.

1.6. Necesidad de estudiar el rendimiento de las fuentes primarias de energía fósil

Con la madurez de la revolución industrial, las sociedades modernas tuvieron la oportunidad de explotar fuentes energéticas de alta calidad, como los combustibles fósiles, produciendo mayor ventaja comparativa que cualquier otra fuente de energía utilizada en el pasado. El aprovechamiento del carbón, luego del petróleo y gas natural, cambiaron la organización de las sociedades, redefiniendo las actividades preindustriales en actividades con mayor complejidad. La tecnificación a partir del uso de fuentes fósiles logró mejoras en la productividad de las sociedades en términos de tiempo y uso de la tierra (Barça, 2011).

Mientras aumentaron los niveles de productividad del trabajo y de la producción energética, las sociedades obtuvieron más tiempo libre disponible para diversificar el rango de actividades a lo largo del tiempo (Tainter, 2011; Cipolla, 1978; Zipf, 1941). No hay duda que la prosperidad económica de las sociedades se ha materializado por la abundante disponibilidad de petróleo barato (Cottrell, 1955; Hall y Klitgaard, 2011; Smil, 2008), sin embargo, esta abundancia, entre otros factores, ha impulsado la concepción del crecimiento económico infinito, lo que se ha convertido en una amenaza, ahora que el uso de los recursos se ha vuelto limitado (Daly, 1977; Goodland et al., 1992).

Como se identificó en la introducción de esta Tesis, los límites en la oferta de petróleo tradicional de alta calidad y de los impactos ambientales y sociales asociados a su extracción, son parte del problema para el sostenimiento de las dinámicas sociales. En economías dependientes de los combustibles fósiles y sociedades golpeadas por la contaminación ambiental, el concepto de puntos máximos en la producción de petróleo y las severas evidencias de contaminación de desechos sólidos y de emisiones de gases de efecto invernadero promueven la necesidad de reajustar los modelos tradicionales de crecimiento hacia el entendimiento de las restricciones biofísicas (Heinberg, 2009; Hubbert, 1948; Odum, 2013).

Las muestras de escasez de las fuentes de petróleo tradicional de alta calidad y la dinámica hacia la extracción de reservas de petróleos no convencionales como shale oil, fracking, extracción de petróleo en aguas profundas, arenas bituminosas, etc, en cuyo caso su complejidad en términos de recursos es mayor (Parra, 2018) y la iniciativa climática mundial para descarbonizar las economías y reducir la emisión de CO₂ para mantener los niveles de crecimiento de la temperatura por debajo de 2 °C (Rogelj et al., 2016), son representaciones claras sobre la necesidad de repensar las relaciones entre la sociedad y los ecosistemas.

Sumado a lo anterior, los elevados patrones de consumo de energía en los diferentes compartimientos de la sociedad son productos de la autoorganización de los sistemas socioeconómicos que marcan la intensidad de los flujos de energía para su funcionamiento. Para ejemplificar las limitaciones metabólicas en el interior del sistema, mientras escribo esta Tesis, el mundo atraviesa una enorme crisis sanitaria por la pandemia provocada por el COVID-19. La reconfiguración social para salvar la especie humana conllevó a tomar medidas extremas en términos de movilidad humana y cierre de industrias de producción masiva de bienes y productos en los principales países del mundo.

En consecuencia, lo expuesto se ve reflejado en la reducción significativa del consumo de petróleo en la composición energética de los sistemas socioeconómicos, por lo menos es evidente mientras dura el aislamiento social. Seguramente cuando pase la emergencia sanitaria, los patrones de consumo y dinámicas sociales opulentas continuarán incrementando la demanda global de energía. En términos metabólicos, las modificaciones que se presentan en los diferentes compartimientos de la sociedad se pueden ver reflejados en la Energy Metabolic Rate *EMR*, que mide la cantidad de energy carrier que se metaboliza por hora de actividad humana fuera de la economía formal y por hora de trabajo asignado al uso final de bienes y servicios, esto se explicará a mayor detalle en el capítulo 4 cuando se use los *EMR* para la construcción de escenarios de consumo de energía en el sistema ecuatoriano.

Entonces, el entendimiento de los sistemas energéticos se puede resumir a) en el análisis de las limitaciones biofísicas de escasez de las fuentes primarias de energía PES y la capacidad de absorción de los desechos y GHG de la naturaleza y b) análisis de los

cambios en la demanda de energía en sus partes internas del sistema socioeconómico producto de la reorganización social de las actividades que determina la necesidad de energía para satisfacer los requerimientos de bienes y productos bajo un esquema de crecimiento escogido.

Las políticas globales en el ámbito energético proponen trabajos en dos vías; por el lado de la demanda se induce hacia la eficiencia en el uso de energy carrier, mientras que en el lado de la oferta la apuesta es reemplazar las fuentes de energía fósil por fuentes renovables (Smil, 2008). Por su lado varias instituciones dedicadas a realizar análisis de los comportamientos en los sistemas de energía pronostican diferentes escenarios en los cuales el petróleo y los combustibles continuarán siendo importantes en la matriz energética de uso final. Por ejemplo, la IEA pronostica al 2035 que $4,4 \times 10^9$ tep de petróleo y combustibles se usarán para abastecer 12×10^9 tep de energía final a nivel mundial (International Energy Agency, 2018).

De cualquier modo, para guiar la política durante la transición energética esperada, se tiene que garantizar la mejor utilización de la energía fósil al construir una matriz energética alternativa y el monitoreo del efecto de la reducción progresiva de la calidad de las fuentes de energía fósil. Para lograr estas tareas, es importante desarrollar herramientas analíticas capaces de caracterizar el rendimiento de las fuentes de energía primaria disponibles/ potenciales y sus cambios de calidad esperados en el tiempo. Hasta ahora, el análisis de la calidad de las fuentes de energía primaria ha sido esencialmente realizado por empresas privadas utilizando narrativas económicas que caracterizan el desempeño de las fuentes de energía potenciales en términos de costos y beneficios económicos (Giampietro et al. 2013).

Este enfoque específico en el análisis económico puede explicarse fácilmente por el hecho de que el interés de la industria energética era identificar inversiones prometedoras en relación con sus esfuerzos de I + D. Sin embargo, la creciente preocupación por la sostenibilidad del patrón existente de desarrollo económico descrito en este capítulo, faculta la generación de un análisis efectivo sobre el desempeño de la explotación de fuentes de energía primaria centrándose en la interacción de la sociedad con la fuente de energía primaria para producir y consumir portadores de energía secundarios. Enfocarse

solo en la calidad de la fuente de energía "per se" puede resultar fuera de lugar (Giampietro et al. 2013).

Esta Tesis propone ampliar el entendimiento de los problemas que atañe a los sistemas energéticos actuales, analizando el rendimiento de la extracción de petróleo como fuente primaria de energía y su relación con la sociedad en la producción de energy carrier para garantizar las funciones requeridas de los sistemas e identificando sus restricciones biofísicas en términos de escasez y sumidero.

1.7. Referencias

Allen, P., 1997. *Cities and Regions as Self-organizing Systems* Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.

Allen, T.F.H. and Starr, T.B., 1982. *Hierarchy*. Chicago: University of Chicago Press.

Barca, S., 2011. 'Energy, property, and the industrial revolution narrative', *Ecological Economics*. Vol. 70 pp. 1309–1315.

Berkes, F., Colding, J. and Folke, C., 1998. *Linking Social and Ecological Systems. Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge University Press.

Berkes, F., Colding, J. and Folke, C., 2003. *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press.

Broto, V. C., Allen, A., & Rapoport, E., 2012 . *Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism*. *Journal of Industrial Ecology*, 16(6), 851–861. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00556.x>

Cadillo, J., 2015. *El uso de la gramática del MUSIASSEM para el análisis cuantitativo de la sostenibilidad de los sistemas alimentarios*. Universidad Autónoma de Barcelona.

CEPROEC, 2015. https://www.researchgate.net/publication/283505557_Potencial_de_la_gramatica_del_MuSIASEM_en_la_representacion_del_analisis_de_la_sostenibilidad [accessed May 02 2020].

Cleveland C.J., 1999. *Biophysical Economics: From Physiocracy to Ecological Economics and Industrial Ecology*. In Mayumi, K. and Gowdy, J. (eds) (1999)

- Bioeconomics and Sustainability: Essays in Honor of Nicholas Georgescu--Roegen, (pp. 125---154) Edward Elgar, Cheltenham, UK.
- Cottrell, W.F., 1955. Energy and Society: The Relation between Energy, Social Change, and Economic Development, McGraw---Hill, New York.
- Cipolla, C. M., 1978. Historia económica de la población mundial. Crítica.
- Daly, H. E., 1977. Steady--state economics: The economics of biophysical equilibrium and moral growth. San Francisco: W. H. Freeman.
- Daly, H. E., 1992. Allocation, distribution and scale: toward an economics that is efficient, just, and sustainable. *Ecol.Econ.*6(3),185-193.
- Díaz, F., 2013. The viability and Desirability of Alternative Energy Sources. Universidad Autónoma de Barcelona
- Dyke, C., 1988. The Evolutionary Dynamics of Complex Systems: a Study in Biosocial Complexity, Oxford University Press
- Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C. S., & Walker, B., 2002. Resilience and sustainable development: Building adaptive capacity in a world of transformations. *Ambio*, 31(5), 437--440. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.5.437>
- Fischer-Kowalski, M., 1998. 'Societal metabolism: The intellectual history of material flow analysis part I, 1860-1970', *Journal of Industrial Ecology*, vol 2, no 1, pp 61--78.
- Fischer-Kowalski, Marina, 1997. Society's metabolism: on the childhood and adolescence of a rising conceptual star, en Michael Redclift y Graham Woodgate, eds., *The International Handbook of Environmental Sociology*, Cheltenham.
- Folke, C., Carpenter, S.R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., Rockström, J., 2010. Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society* 15.
- Georgescu-Roegen, N., 1966. Analytical economics: Issues and problems. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Georgescu-Roegen, N., 1971. The entropy law and the economic process. Cambridge, MA: Harvard University Press.

- Georgescu-Roegen, N., 1975. Energy and economic myths. *Southern Economic Journal* 41,347-381.
- Georgescu-Roegen, N., 1976. *Energy and economic myths: Institutional and analytical economic essays*. New York: Pergamon Press.
- Giampietro, M., 1997. Socioeconomic pressure, demographic pressure, environmental loading and technological changes in agriculture, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 65: 201-229.
- Giampietro, M., 2003. *Multi-scale integrated analysis of agro-ecosystems*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Giampietro, M. and Mayumi, K., 2000a. Multiple-scale integrated assessment of societal metabolism: Introducing the approach, *Population and Environment*, vol 22, no 2, pp 109–153.
- Giampietro, M. and Mayumi, K., 2000b. ‘Multiple-scales integrated assessments of societal metabolism: Integrating biophysical and economic representations across scales’, *Population and Environment*, vol 22, no 2, pp 155–210.
- Giampietro, M., Allen, T. F., and Mayumi, K., 2006. The epistemological predicament associated with purposive quantitative analysis. *Ecological Complexity* 3, 307-327.
- Giampietro, M., Mayumi, K. & Sorman, A.H., 2012. *The Metabolic pattern of societies : where economists fall short*. London: Routledge.
- Giampietro, M., Mayumi, K. & Sorman, A.H., 2013. *Energy Analysis for a Sustainable Future: Multi-scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism*.UK:Routledge.
- Giampietro, M., Mayumi, K., Sorman, A. H., 2011. *The Energetics of Modern Societies – Cutting through the confusion*, Springer
- Giampietro, M., 2018. Anticipation in Agriculture, in *Handbook of Anticipation*, Cham: Springer International Publishing, pp. 1–35.
- Giampietro, M., 2019. On the Circular Bioeconomy and Decoupling: Implications for Sustainable Growth. *Ecological Economics*, 162(May), 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.05.001>

- Giampietro, M., & Funtowicz, S. O., 2020. From elite folk science to the policy legend of the circular economy. *Environmental Science and Policy*, 109(April), 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.04.012>
- Gómez Marín, R., 2002. Arquitectura teórica de la complejidad paradigmática, in: Gunderson, L. and Holling, C., 2002. *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*.
- González de Molina, Manuel; Toledo, Víctor M., 2014. *The Social Metabolism: A Socio-Ecological Theory of Historical Change* (en inglés). Springer. ISBN 978-3-319-06357-7.
- Goodland, R. J. A., Daly, H. E., & El, S. S., 1992. *Population, technology, and lifestyle: The transition to sustainability*. Washington, D.C: Island Press.
- Greenpeace, 2019. <https://www.greenpeace.org/international/>.
- Hall, C., and Klitgaard, K., 2011. *Energy and the wealth of nations: understanding the biophysical economy*. Springer Science & Business Media.
- Heinberg, R., 2009. *The oil depletion protocol: A plan to avert oil wars, terrorism and economic collapse*. New Society Publishers.
- Holling, C., 2001. Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems, *Ecosystems*, vol. 4, no. 5, pp. 390–405.
- Hubbert, M. K., 1948. Energy From Fossil Fuels. *Science* (80-.). 108, 589–590. [doi:10.1126/science.109.2823.103](https://doi.org/10.1126/science.109.2823.103).
- International Energy Agency IEA, 2019. *Energy Technology Perspectives*. <https://www.iea.org/topics/energy-technology-perspectives>.
- International Energy Agency, 2018. *World Energy Outlook 2018: Highlights*. 23–28. <https://doi.org/10.1787/weo-2018-2-en>.
- Kaufmann, S., 1993. *The origins of order*, Oxford University Press.
- Koestler, A., 1967. *The Ghost in the Machine*. NY: MacMillan.
- Koestler, A., 1968. *The ghost in the machine*. New York: The MacMillan Co.
- Lotka A., 1924/1956. *Elements of Mathematical Biology*. NY: Dover.
- Martinez-Alier, J., 1987. *Ecological Economics. Energy, Environment and Society*.

- Blackwell, Oxford, U.K.
- Martinez-Alier, J., 1995. The environment as a luxury good or “too poor to be green”? *Ecol.Econ.*13(1).1-10.
- Morowitz, H., 1979. *Energy flow in biology*. Woodbridge: Ox Bow Press.
- Neurath, O., 1946. The orchestration of the sciences by the encyclopedism of logical empiricism. *Philosophy and Phenomenological Research*, 6(4), 496-508.
- Odum, H. T., 2013. *Environment, power and society*. Columbia University Press.
- Odum, H.T., 1971. *Environment, power and society*. New York: Wiley-Interscience.
- Odum, H.T., 1983. *Systems ecology*. New York: John Wiley.
- Odum, H.T., 1996. *Environmental accounting: Energy and environmental decision making*. New York: John Wiley.
- Odum, H.T. and Pinkerton, R.C., 1955. Time’s speed regulator: The optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems. *American Scientist* 43, 321-343.
- O'Neill, R. V., DeAngelis, D. L., Waide, J. B. and Allen, T. F. H., 1986. *A hierarchical concept of ecosystems*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- O'Neill, R.V., 1989. Perspectives in hierarchy and scale. In: Roughgarden, J., May, R.M., Levin, S. (Eds). *Perspectives in Ecological Theory*. pp 140-156. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Organización Latinoamericana de Energía OLADE, 2019. *Presentación sobre las Perspectivas Energéticas*. Seminario Internacional de Innovación y Retos Tecnológicos del Sector Energético en la Cuarta Revolución Industrial. Quito-Ecuador 2019.
- Ostrom, E., 2009. A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science* 325, 419–422.
- Parra, R., Di Felice, L. J., Giampietro, M., & Ramos-Martin, J., 2018. The metabolism of oil extraction: A bottom-up approach applied to the case of Ecuador. *Energy Policy*, 122(July), 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.017>.
- Pattee, H.H. (ed.), 1973. *Hierarchy theory*. New York: George Braziller, Inc.

- Pimentel, D., 1980. Handbook of energy utilization in agriculture. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Pimentel, D. and Pimentel, M., 1979. Food, energy, and society. London: Edward Arnold Ltd.
- Prigogine, I., 1961. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes, 2nd editio.ed. Wiley, New York.
- Prigogine, I., 1978. From Being to Becoming. W.H. Freeman, San Francisco, CA
- Rogelj, J., Den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Meinshausen, M., 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °c. Nature, 534(7609), 631–639. <https://doi.org/10.1038/nature18307>.
- Rosen, R., 1977. Complexity as a system property. International Journal of General Systems, 3(4), 227–232. <https://doi.org/10.1080/03081077708934768>
- Rosen, R., 2000. Essays on Life Itself, Axiomathes.
- Salthe, S.N., 1985. Evolving hierarchical systems. New York: Columbia University Press.
- Schneider, E.D. and Kay, J.J., 1994. Life as a manifestation of the second law of thermodynamics. Mathematical and Computer Modelling 19, 25-48.
- Simon, H. A., 1962. The architecture of complexity. Proceedings of the American philosophical society 106, 467-482.
- Smil, V., 2008. Energy in Nature and Society, General Energetics of Complex Systems.
- Tainter, J.A., 2011. ‘Energy, complexity, and sustainability: A historical perspective’ Environmental Innovation and Societal Transitions, pp 89--- 95.
- The Institute of Energy Economics, Japan – IEEJ, 2019. <https://eneken.ieej.or.jp/en/>.
- Turner.R.K., 1992. ”Speculations on strong and weak sustainability”.CSERGE working paper GEC.92-26.
- Ulanowicz, R., 1995. Ecosystem integrity: A causal necessity, in: Westra, L., Lemons, J. (Eds.), Perspectives on Ecological Integrity. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, pp. 77–87.
- Ulanowicz, R.E., 1986. Growth and development: Ecosystem phenomenology. New

York: Springer-Verlag.

Wolman, A., 1965. The Metabolism of Cities, *Sci. Am.*, 213(3): 178–190,

World Energy Council-WEC, 2019. <https://www.worldenergy.org/g>.

Zipf, G., 1941. National unity and disunity: the nation as a bio-social organism.
Bloomington: The Principia Press.

Capítulo II

El metabolismo de la extracción de petróleo: un enfoque ascendente aplicado al caso de Ecuador

Este capítulo se basa en la descripción del artículo científico publicado en la revista Energy Policy en 2018, por lo cual la información utilizada para el desarrollo de la contabilidad energética se refiere a datos del 2016².

2.1. Resumen

El sistema energético mundial depende en gran medida de los combustibles fósiles, que cubrieron aproximadamente el 90% de las fuentes de energía primaria en 2016. A medida que cambia la calidad y la cantidad de petróleo extraído, en respuesta a los cambios en los usos finales y en respuesta a las limitaciones biofísicas, es necesario comprender el metabolismo de la extracción de petróleo y su relación entre las entradas utilizadas y la salida de flujos extraídos.

En este capítulo se formaliza una metodología para describir la extracción de petróleo basada en la distinción entre elementos funcionales y estructurales, utilizando el Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM) para generar un diagnóstico del rendimiento de la extracción de petróleo y la construcción de escenarios, además el análisis permite generar puntos de referencia modulares que pueden ser aplicados a otros países productores de petróleo. Como resultado se muestra que la extracción de petróleo en Ecuador consumió por cada m^3 de petróleo, más de 100 kWh de electricidad y 1,5 GJ de combustibles, 3 kW de capacidad de energía y 2 horas de actividad humana. Finalmente se desarrolla un escenario para verificar los efectos sobre el patrón metabólico de Ecuador de un aumento en la producción de petróleo en los

² DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.017>

próximos cinco años, destacando la fortaleza de la metodología propuesta y enfocándose en la adaptabilidad del método para tratar temas de políticas energética.

2.2. Introducción

A pesar de los esfuerzos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y cambiar hacia un sistema de energía renovable, el petróleo sigue siendo una parte esencial de la cadena energética mundial, con $3,8 \times 10^9$ tep consumidos en 2015, de un consumo total de energía final de $9,3 \times 10^9$ tep (IEA, 2017). Esto se debe en parte al hecho de que la mayoría de los sistemas renovables proponen una alternativa a la electricidad, en lugar de los combustibles. Con los problemas de sostenibilidad vinculados a los biocombustibles, particularmente debido a las preocupaciones sobre el uso de la tierra en relación con la seguridad alimentaria (Rathmann et al., 2010), así como a su bajo rendimiento energético (Rajagopal et al., 2007), es poco probable que los combustibles convencionales sean eliminados en el futuro cercano.

Dado el enorme papel que desempeña el petróleo en las sociedades, es importante comprender su metabolismo, como la interacción de factores internos que determinan la relación entre el perfil de entradas y salidas, particularmente en relación con el consumo interno de los energy carrier y otros flujos y fondos como: agua, productos químicos, capacidad energética y actividad humana.

La mayoría de los estudios existentes sobre el metabolismo del sector de extracción de petróleo representan una entrada de interés, sin embargo, faltan evaluaciones holísticas que tengan en cuenta más de un fondo o flujo a la vez, y que sea posible analizar los fenómenos en diferentes niveles. Uno de los objetivos de este documento es llenar este vacío metodológico mediante el uso de Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM), con lo cual se propone un enfoque alternativo para formalizar la gramática asociada con el proceso de extracción de petróleo en Ecuador, siguiendo estudios previos encontrados en la literatura para el sector de petróleo y gas en Brasil (Aragão y Giampietro, 2016), el sector de gas en México (González-López y Giampietro, 2018) y para el metabolismo eléctrico de Cataluña (Di Felice et al., 2018).

El objetivo del documento es doble: por un lado, desarrollar herramientas metodológicas que nos permitan describir el proceso de extracción de petróleo contabilizando varios flujos y fondos en diferentes niveles y por el otro, aplicar la metodología al caso del Ecuador, caracterizando los factores que determinan el metabolismo actual y proponiendo la construcción de un escenario para la extracción futura.

En primer lugar, se proporciona información de antecedentes y una revisión de la literatura existente para abordar el análisis de los sistemas de extracción de petróleo. Luego se describe varios fundamentos de MuSIASEM y su gramática energética propuesta, centrándose en la distinción entre elementos funcionales y estructurales; se discuten las fuentes de datos y su confiabilidad y se proporcionan los resultados mostrando cómo se construye la gramática de extracción de petróleo a través de un enfoque ascendente. Finalmente, el documento ilustra un escenario de extracción de petróleo futura en Ecuador, exponiendo cómo se puede aplicar la gramática modular ascendente para verificar las restricciones en los estados futuros. Se concluye resumiendo los principales hallazgos, con respecto a la metodología y sus posibles aplicaciones en términos de política energética, además se muestra las limitaciones del estudio y se propone mejoras que son abordadas en el capítulo III.

2.3. Antecedentes y revisión de la literatura

América Latina es un exportador neto de petróleo y gas, y las políticas públicas están presionando para aumentar la capacidad de extracción y refinación en los próximos años, aunque las regulaciones varían de un país a otro (Hollanda et al., 2016). En Ecuador, a medida que las reservas de petróleo convencionales se agotan con el tiempo, las proyecciones gubernamentales de reservas sugieren que se está produciendo un cambio gradual de petróleo ligero y mediano a pesado (Secretaría de Hidrocarburos, 2016a). La extracción de petróleo en Ecuador es menor (28×10^6 tep en 2015) en comparación con otros países latinoamericanos como México (131×10^6 tep en 2015) o Brasil (133×10^6 tep en 2015) (Agencia Internacional de Energía, 2017). Sin embargo, la extracción en Ecuador a nivel nacional ha estado creciendo constantemente en los últimos años, casi duplicándose entre 2000 y 2014 (Hollanda et al., 2016).

La cantidad de petróleo extraído supera la capacidad de refinación del país, lo que significa que el país es un exportador neto de petróleo, pese a ello la demanda de combustibles nacional supera a la producción de las refinerías, por lo cual el país se convierte en importador neto de combustible. Las dos principales políticas energéticas en Ecuador en los últimos años han sido, por un lado, la construcción de nuevas represas hidroeléctricas (MICSE, 2016) y, por otro, el desarrollo de nueva capacidad de refinamiento, con el proyecto de construcción de una nueva refinería (Refinería del Pacífico) que permitirá el procesamiento de 300.000 barriles adicionales de petróleo por día (MICSE, 2016), cerrando la brecha entre el petróleo extraído y los combustibles refinados.

Por el lado de la extracción, desde la reforma a la ley de hidrocarburos de julio de 2010 (Asamblea Nacional, 2010), existió un cambio de los contratos de participación a los contratos de prestación de servicios. En 2012 se estableció una política para "comercializar el petróleo y sus productos secundarios, preferiblemente con empresas estatales y consumidores públicos" (EP Petroecuador, 2012). Esto permitió fortalecer el papel de Ecuador en los mercados internacionales, ya que ahora tiene acuerdos de venta futura del petróleo hasta el 2024. Como consecuencia, la economía del país se vería fuertemente afectada por una disminución en la extracción en los próximos años, especialmente si tenemos en cuenta que, en 2015, las exportaciones de petróleo representaron 6.662 millones de US\$, o el 36% de las exportaciones totales (Ministerio de Comercio Exterior, 2016).

En general, los objetivos de política de Ecuador descritos en la agenda energética nacional de 2016-2040 apuntan hacia una extensión del horizonte de hidrocarburos, con un enfoque en el petróleo y el gas natural, para satisfacer el consumo local y aumentar las exportaciones. Dentro de este contexto, es importante comprender cómo funciona el metabolismo actual de la extracción de petróleo y evaluar los efectos de tales políticas en el futuro metabolismo energético del país.

Alejándose del estudio de caso en cuestión y mirando discursos más amplios de extracción de petróleo, mientras que la popularidad y la urgencia percibida del concepto de pico de petróleo varía entre los grupos de investigación, está claro que hay un cambio global hacia la extracción de petróleo no convencional y esquisto bituminoso, que

requiere mayores inversiones tecnológicas y energéticas (World Energy Council, 2016). Se han llevado a cabo varias evaluaciones centradas en la cantidad de energía necesaria para extraer petróleo, principalmente utilizando la tasa de retorno Energético (EROI) o análisis del ciclo de vida (ACV).

Los ACV proporcionan descripciones detalladas de las entradas y salidas de los procesos, pero su papel para la formulación de políticas ha sido cuestionado por varios autores (Ayres, 1995), capítulo 4 de (Horne et al., 2009). Esto se debe principalmente a tres limitaciones: a) la información a menudo se reduce a un solo parámetro o indicador, lo que impide la transparencia del cálculo, proporcionando un único parámetro de salida en lugar de una visión general del proceso; b) en segundo lugar, elegir los límites "correctos" es problemático, lo que genera resultados muy diferentes para el mismo proceso; c) los ACV no permiten una escala adecuada en los diferentes niveles de análisis.

Las evaluaciones actuales de los procesos de extracción de petróleo se han centrado principalmente en evaluar las reservas de petróleo dentro de un contexto de pico de petróleo (Owen et al., 2010), verificar los impactos ambientales de la extracción de petróleo (Bravo, 2007) o cuantificar la energía devuelta a la energía invertida (EROI) (Court and Fizaine, 2017; Murphy and Hall, 2011). También existen extensiones de EROI que usan eMergy (Chen et al., 2017), así como otros estudios que analizan el EROI de tecnologías particulares, como la producción de biodiesel (Poddar et al., 2017).

La mayoría de los análisis recientes sobre el consumo de energía en la extracción de combustibles fósiles se centran en las arenas bituminosas (Brandt et al., 2013b; Lazzaroni et al., 2016; Nimana et al., 2015). Brandt y col. (Brandt et al., 2013b), por ejemplo, calculan las relaciones de retorno de energía para el período entre 1970 y 2010, proponiendo una metodología orientada a ACV para calcular el retorno de energía. Una diferencia importante entre su metodología y la presentada aquí es que el trabajo de Brand et al., no divide las entradas en diferentes portadores de energía. Se argumentará que esta distinción es de suma importancia para comprender el comportamiento de los sistemas de energía. Otros estudios analizan casos particulares de tecnologías, como la extracción de aceite de microalgas (Peralta-Ruiz et al., 2013), incluido el consumo de energía del proceso.

En un trabajo diferente, Brand et al. (2013a) presenta un enfoque ascendente basado en ACV y en la matriz de eficiencia energética y los rendimientos netos de energía a diferentes escalas. Hasta donde se conoce, este es el ejercicio más cercano al presentado en este capítulo, ya que permite trabajar con diferentes escalas. Dada la falta de distinción entre fondos y flujos en el trabajo de Brand et al., El método presentado aquí puede verse como un estudio complementario a su enfoque, integrando información adicional que puede ser de particular relevancia para la informar la política energética. El método ascendente de entrada y salida también se han utilizado para estimar el uso de energía de la extracción de combustibles fósiles, como en el caso de la extracción de gas de esquisto en China (Chang et al., 2014). Aquí, a pesar de tener información sobre las diferentes entradas utilizadas en el proceso de extracción de gas de esquisto (portadores de energía, agua, arena, grava, etc.), todas las entradas se convierten en requisitos de energía.

En la literatura se presta menos atención al uso del agua para la extracción de fuentes primarias. Ali y Kumar (2017) proporcionan una excepción, al centrarse en los coeficientes de demanda de agua durante el ciclo de vida de los combustibles producidos a partir del petróleo. Sus coeficientes, aunque calculados para pozos estadounidenses, son de magnitud similar a los presentados en este estudio.

Centrándose de nuevo en el caso ecuatoriano, se han realizado estudios que destacan diferentes dimensiones de la extracción de petróleo. FLACSO ha producido una serie de estudios que revisan el estado actual de la extracción de petróleo en relación con el desarrollo sostenible (Fontaine, 2003). Desde una perspectiva de justicia ambiental, varios estudios han evaluado los impactos sociales y ambientales de la extracción de petróleo en las poblaciones locales (ver, por ejemplo, (Vallejo et al., 2015 y Rodríguez, 1998)).

Los impactos ambientales de la extracción de petróleo en los acuíferos y el consumo de agua no se han evaluado específicamente para Ecuador, pero existen estudios sobre el tema, por ejemplo, en relación con la perforación en aguas profundas (Cordes et al., 2016) y la extracción de gas de esquisto (Vidic et al., 2013). Para contribuir al debate sobre el metabolismo de la extracción de petróleo, este estudio presenta la aplicación de una nueva metodología de contabilidad para los diferentes fondos y flujos empleados, como se describe en la siguiente sección.

2.4. Materiales y metodología

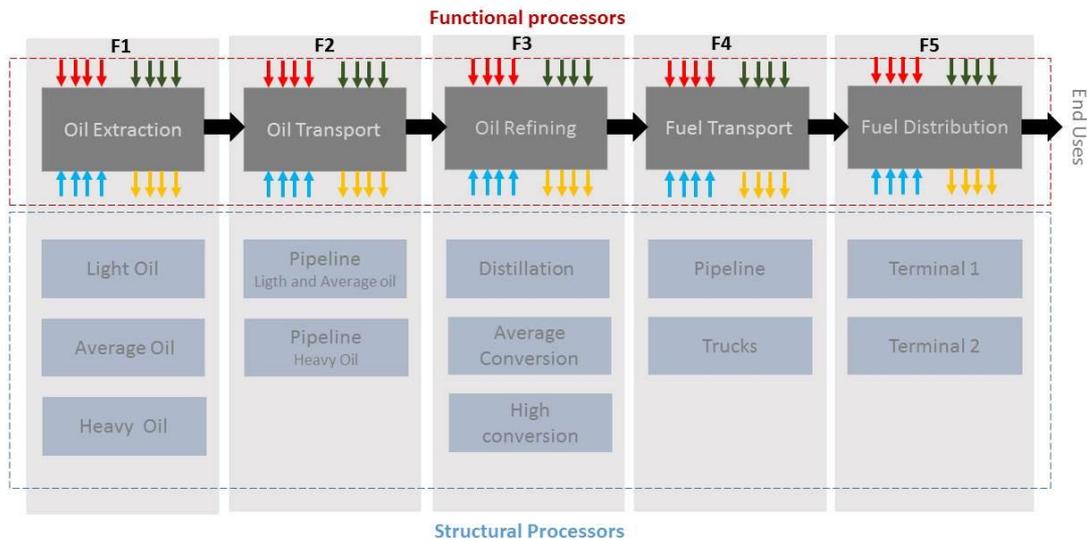
2.4.1. MuSIASEM - Gramática energética- Procesadores

A manera de resumen de lo descrito en el capítulo 1, MuSIASEM es un esquema contable y su enfoque proporciona una aplicación basada en la comprensión de fondos y flujos, que vincula variables socioeconómicas y biofísicas de manera integrada. El uso de gramáticas es clave para el enfoque. Una gramática puede verse como un conjunto de relaciones que vinculan categorías formales con categorías semánticas. En resumen, esto significa que los datos, en este caso referidos a la energía, se organizan de una manera que tenga sentido de las relaciones esperadas en un todo funcional, vinculando elementos que operan en diferentes niveles del sistema y manteniendo distinciones cruciales entre los componentes que juegan diferentes funciones (Ver Fig.1-1).

Los desarrollos recientes en MuSIASEM han visto la introducción de una nueva herramienta conceptual llamada procesador (Giampietro, 2018; González-López y Giampietro, 2017; Ripa y Giampietro, 2017; Ripoll-Bosch y Giampietro, 2017), cuyo objetivo es describir las entradas y salidas de flujos y fondos de un determinado proceso que lo vincula con procesos tanto en el mismo nivel como en diferentes niveles. La Fig. 2-1 muestra un ejemplo de una ruta secuencial de procesadores para la cadena de combustible, comenzando por la extracción de petróleo y terminando con la distribución de combustibles para los usos finales en la sociedad. Aquí, la salida de un procesador se convierte en una entrada para el siguiente, y cada procesador que cumple una determinada función (por ejemplo, "extracción de petróleo") puede asignarse a diferentes procesadores estructurales.

Cada procesador se caracteriza por un perfil de entradas y salidas. Las entradas procedentes de la sociedad (producidas por procesos bajo control humano) se representan en la parte superior del procesador. La salida útil, ya sea que cumple una función para un siguiente procesador o la utilización en la sociedad, está representada por la flecha que sale del procesador a la derecha. Las entradas del ecosistema (flechas azules) y las salidas al ecosistema, como las emisiones (flechas amarillas), se representan en la parte inferior.

Figura 2-1: Patrón metabólico secuencial de los procesadores, desde la extracción de petróleo hasta los usos finales



Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

La diferencia entre procesadores funcionales y estructurales se explica brevemente en la siguiente subsección.

2.4.2. Elementos funcionales y estructurales de la extracción de petróleo

Los procesadores estructurales describen un proceso que tiene lugar a través de una tecnología o método específico (por ejemplo, extracción de petróleo con perforación en aguas profundas). Las características de estos procesadores reflejan los coeficientes técnicos determinados por la estructura organizativa de la planta que lleva a cabo el proceso. Los procesadores funcionales, por otro lado, describen elementos nocionales de un proceso cuyo objetivo es proporcionar una función dentro de un sistema más amplio (por ejemplo, combustible para el sistema de transporte).

Las características de estos procesadores están definidas por la función que debe expresarse para estabilizar el metabolismo de un todo más grande o la representación del sistema en su totalidad. La ecología teórica explica la definición nocional de un procesador funcional en términos de información mutua, es decir, una vía metabólica (metabolic pathway), define una imagen virtual de las características metabólicas del

nodo (network niche) que es independiente de las características reales del elemento del nodo (Ulanowicz, 1986).

En los sistemas complejos organizados en diferentes niveles jerárquicos, la definición de la relación sobre elementos estructurales y funcionales depende del caso, ya que puede cambiar de acuerdo con el nivel, la escala y el objetivo del análisis. Como se muestra en la Fig. 2-1, los diferentes pasos dentro de la ruta metabólica secuencial (metabolic pathway) del suministro de combustibles cumplen diferentes funciones, comenzando desde la extracción de petróleo y terminando con la distribución de combustible para los usos finales. Para cada función se pueden expresar e identificar diferentes estructuras, dependiendo del objetivo del análisis.

En el estudio actual, nos enfocamos en el procesador funcional de extracción de petróleo, destacando el primer paso que se muestra en la Fig. 2-1. Al operar en un nivel de análisis más bajo, dividimos el procesador funcional de extracción de petróleo en dos subfunciones adicionales: extracción de petróleo medio y extracción de petróleo pesado, basado en la gravedad API descrita en la Tabla 2-1. Esta distinción depende del caso, ya que en Ecuador el petróleo ligero representa menos del 1% del petróleo total extraído, y no se extrae petróleo extra pesado.

Tabla 2-1: Clasificación del petróleo por gravedad API

API gravity(°)	Classification
>31°	Light oil
22° - 31°	Medium oil
10° - 22°	Heavy oil
<10°	Extra heavy oil

Fuente: Clasificación del petróleo por gravedad API. Recuperado de <http://www.petroleum.co.uk/api>

En este caso, las funciones no se definen en el nivel social, sino en el siguiente nivel de organización dentro del cual opera la función de extracción (es decir, en la interfaz entre la extracción y la refinación de petróleo). Para cada subfunción identificamos diferentes estructuras de extracción de petróleo, dependiendo de la cantidad de agua y sedimentos (BSW) generada en el proceso de extracción (La categorización basada en BSW se aclara en la Tabla 2-2). Los cuatro tipos estructurales identificados de BSW varían según el tipo

de petróleo extraído y no todas las tipologías tienen cada elemento estructural. Para el sistema de extracción del Ecuador, la producción de petróleo medio identifica categorías estructurales con alto BSW y moderado BSW.

La distinción estructural basada en la cantidad de BSW se elige para este estudio de caso, ya que los fondos y flujos asociados con la extracción de petróleo dependen en gran medida de la cantidad de fluido total (referido al petróleo crudo, agua y gas) extraído, y no solo a la cantidad total de petróleo crudo extraído.

Tabla 2-2: Categorización estructural basada en el uso de BSW

BSW	Structural type
>90%	Extra high
60% - 90%	High
30% - 60%	Moderate
<30%	Low

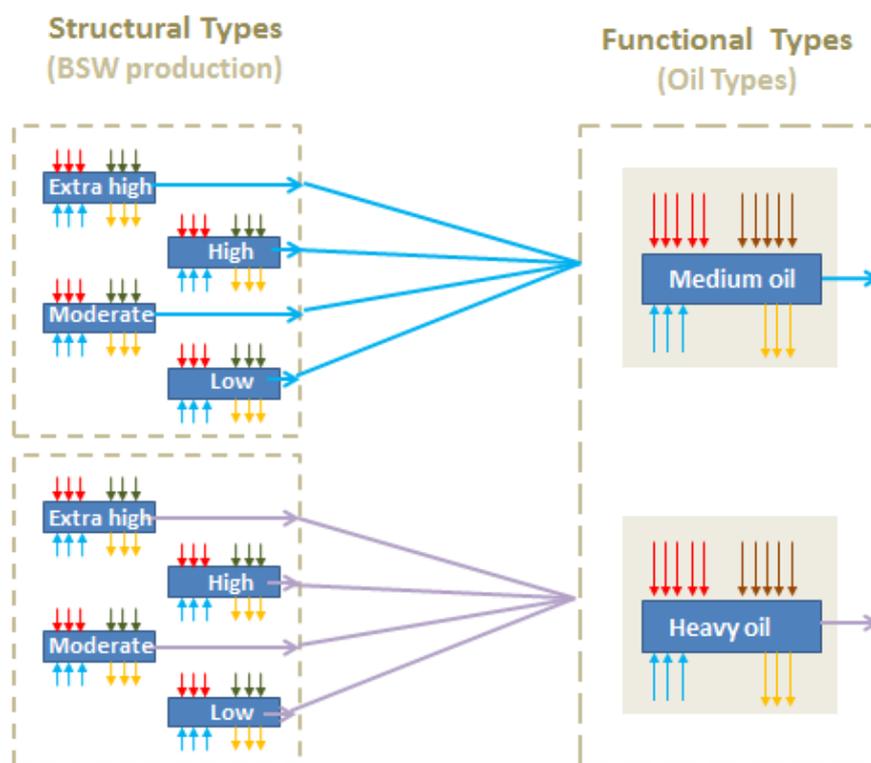
Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

Se crean procesadores para cada elemento estructural, mapeando los flujos y fondos de entrada y salida. En la Figura 2-2, ampliamos el estudio de caso actual para mostrar los procesadores funcionales y estructurales elegidos.

La desagregación entre los tipos funcionales y estructurales es esencial para los sistemas energéticos, y particularmente útil cuando se trata de generar información para la formulación de políticas. Ser capaces de caracterizar los sistemas energéticos de forma modular tanto en términos de lo que hacen (funciones) y cómo lo hacen (estructuras) nos proporciona las herramientas fundamentales necesarias para abordar los problemas energéticos actuales; esto es tan crucial como la contabilidad de los fondos (de qué está hecho el sistema) y flujos (qué hace el sistema).

De hecho, muchos análisis cuantitativos no abordan la funcionalidad de los elementos del sistema que depende de la cantidad (tamaño) y la calidad (características metabólicas) de los fondos.

Figura 2-2: Procesadores estructurales y funcionales del estudio de caso



Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

2.5. Obtención de datos

Todos los datos presentados en este capítulo se refieren al 2016. Los datos para el estudio se obtuvieron a través de fuentes primarias y secundarias. Las instituciones que administran información estadística del Ecuador, incluidas ARCH, ARCONEL, PETROAMAZONAS EP y EP PETROECUADOR, brindan una descripción detallada de las estadísticas en los subprocesos involucrados en la extracción de petróleo. Los datos faltantes fueron calculados y obtenidos a partir de entrevistas: Las horas de actividad humana, se calcularon considerando el número total de trabajadores, tanto directos como indirectos, y contabilizando la cantidad de horas trabajadas para cada tipo de trabajo (dividiéndolos en trabajos administrativos y trabajos operativos) (ARCH, 2016; ARCONEL, 2016; Petroamazonas, 2016; Petroecuador, 2016).

Se realizaron veinticinco entrevistas con trabajadores en diferentes bloques petroleros entre marzo de 2016 y marzo de 2017 para recopilar cualquier otro dato útil que falte de las estadísticas nacionales y para verificar la coherencia de los datos de arriba hacia abajo.

Por lo tanto, los datos finales utilizados en el análisis se consideran altamente confiables, ya que las verificaciones cruzadas con entrevistas han permitido confirmar la información estadística de arriba hacia abajo.

2.6. Resultados y discusión

2.6.1. Caracterizando el sistema energético de Ecuador al 2016

La Tabla 2-3 muestra una visión general del sistema energético de Ecuador, centrándose en las fuentes primarias de energía (primary energy sources-PES) y los portadores de energía (energy carrier-CE), incluidas las importaciones y exportaciones. La contabilidad de energía fue realizada con datos del 2015 tomada del balance energético anual de Ecuador, publicado por el Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016), ya que al momento de realizar el estudio los datos para 2016 aún no se encontraban disponibles. El análisis muestra que petróleo representa cerca del 90% de la combinación de energía primaria. Sin embargo, debido a la falta de capacidad de refinación, Ecuador es un exportador neto de petróleo e importador neto de combustibles refinados.

Tabla 2-3: Producción de PES y EC en Ecuador, 2015 (ktep)

PES	Total extraction	Imports	Exports	
Crude oil	198,527	N/A	146,620	
Natural Gas	10,029	N/A	N/A	
Biomass	6,239	N/A	N/A	

EC	Total production	Imports	Exports	Final Balance
Electricity	16,079	44,032	29	60,082
Fuels (incl. GLP)	19,544	48,356	3,967	63,933

Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

Dejando a un lado la electricidad y enfocándonos únicamente en los combustibles, la Tabla 2-4 muestra el consumo final de combustibles por subsectores de la sociedad, divididos en GLP, diesel, fuel oil y gasolina. La desagregación por calidad de los diferentes combustibles y la diferenciación de los compartimentos sociales es necesaria

para caracterizar los usos finales y poder tener una visión general completa no solo de lo que se produce, sino también de cómo y dónde se consume. Esta caracterización es parte de la gramática de energía propuesta en la Fig. 1-1.

Tabla 2-4: Matriz de uso final por tipo de combustible

Sector	GLP	Gasoline	Diesel oil	Fuel oil	Oil
	TJ	TJ	TJ	TJ	TJ
TR	530	111,362	107,871	15,029	-
IN	3,296	41	42,455	10,911	-
HH	40,159	-	-	<i>negl.</i>	-
SG	2,468	-	12,401	828	-
AF	904	4,987	-	-	-
MC	6,764	46,590	5,518	1,639	-
EM	860	247	31,657	45,358	15,196
Total	54,981	163,227	199,902	73,766	15,196

Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

2.6.2. Construyendo una gramática ascendente

Para construir una gramática energética de abajo hacia arriba, el primer paso es caracterizar los elementos estructurales y funcionales del sistema. Se crean procesadores para cada elemento estructural, mapeando los flujos y fondos de entrada y salida. En la Tabla 2-5, los bloques de extracción en Ecuador se clasifican según el tipo de petróleo extraído.

Tabla 2-5: Bloques de extracción de Ecuador clasificados en función del tipo de petróleo extraído

#		Block	Production (Km3)	% Total production	°API	Type of oil
1	2	GUSTAVO GALINDO	67	0.2	36	Light
2	1	PACOA	2	0.0	33	Light
3	49	BERMEJO	142	0.4	31	Medium
4	64	PALANDA YUCA SUR	124	0.4	24	Medium
5	53	SINGUE	266	0.8	27	Medium
6	60	SACHA	4,221	13.2	26	Medium
7	44	PUCUNA	115	0.4	31	Medium

# Block		Block	Production (Km3)	% Total production	°API	Type of oil
8	56	LAGO AGRIO	224	0.7	29	Medium
9	57	SHUSHUFINDI	6,790	21.2	27	Medium
10	58	CUYABENO-TIPISHCA	1,534	4.8	26	Medium
11	46	MDC SIPEC	471	1.5	24	Medium
12	47	PBHI	289	0.9	26	Medium
13	52	OCANO - PEÑA BLANCA	138	0.4	23	Heavy
14	12	EDEN YUTURI	2,293	7.2	23	Heavy
15	18	PALO AZUL	659	2.1	23	Heavy
16	61	AUCA	3,942	12.3	22	Heavy
17	7	COCA PAYAMINO	1,874	5.9	22	Heavy
18	10	VILLANO	621	1.9	19	Heavy
19	62	TARAPOA	2,016	6.3	21	Heavy
20	45	PUMA	38	0.1	16	Heavy
21	65	PINDO	230	0.7	20	Heavy
22	54	ENO - RON	241	0.8	13	Heavy
23	15	INDILLANA	1,683	5.3	20	Heavy
24	21	YURALPA	330	1.0	17	Heavy
25	31	Bloque 31	973	3.0	18	Heavy
26	43	ITT	487	1.5	14	Heavy
27	55	ARMADILLO	13	0.0	13	Heavy
28	59	VINITA	36	0.1	15	Heavy
29	66	TIGUINO	138	0.4	20	Heavy
30	14	NANTU	211	0.7	19	Heavy
31	17	HORMIGUERO	338	1.1	19	Heavy
32	16	IRO	1,245	3.9	15	Heavy
33	67	TIVACUNO	211	0.7	19	Heavy
Total			31,962			

Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

La Tabla 2-6 muestra ejemplos de procesadores para dos *elementos estructurales*: producción de *petróleo medio con BSW moderado* y producción de *petróleo pesado con BSW alto*. Se recopilan los mismos datos para los ocho procesadores estructurales. Como se explicó anteriormente, los datos que caracterizan las entradas y salidas del procesador, se clasifican en función del modelo de flujos y fondos en base de si son internos (que provienen y van a la "tecnosfera") o externos (que vienen y van a la "biosfera"). A partir de estos dos ejemplos, se puede observar que los valores de ciertos flujos y fondos varían

según la tipología elegida: Por ejemplo, la electricidad producida y consumida en el sitio para la extracción de *petróleo pesado con alto BSW* es casi el doble en comparación con la extracción de *petróleo medio con BSW moderado*. La actividad humana también muestra una gran variación, ya que la producción de *petróleo pesado/alto BSW* requiere cuatro veces la cantidad de actividad humana por metro cúbico de petróleo extraído, en comparación con la producción de *petróleo medio/BSW moderado*.

Lo que se puede observar en la caracterización de estos procesadores es que la extracción de *petróleo pesado con alto BSW* tiende a requerir una mayor entrada de flujos y fondos que la extracción de *petróleo mediano con BSW moderado*. Sin embargo, la extracción de *petróleo pesado con alto BSW* tiende a ser más eficiente en términos de producción de gas ya que se extrae menos gas por unidad de petróleo extraído, lo cual tiene menores aportaciones en la emisión de GEI por la quema de gas asociado, particularidad que se tratará a detalle en el siguiente capítulo.

Tabla 2-6: Ejemplos de flujos y fondos para tres procesadores estructurales. Las cifras pueden no coincidir debido al redondeo

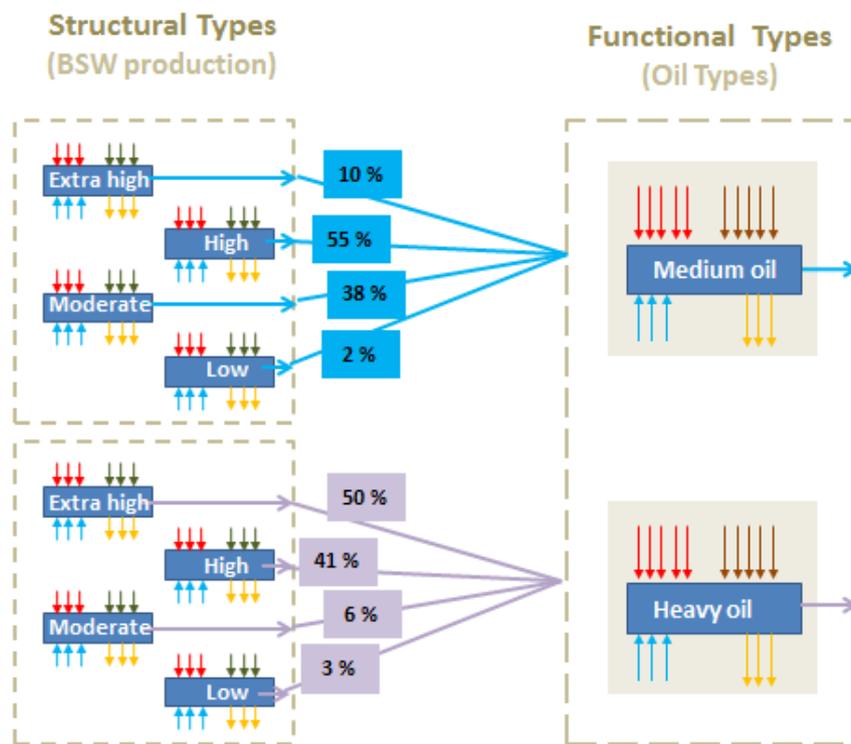
Processor element	Label	Unit (extensive)	Unit (intensive)	Source
<i>Medium oil production / moderate BSW</i>				
Internal Flow	Electricity auto-consumption	kWh 336,685,169	kWh/m3 38	(ARCONEL, 2016)
Internal Flow	Fuel for generation	GJ 3,605,644	GJ/m3 0	(ARCONEL, 2016)
Internal Flow	Fuel oil	GJ 185,188	GJ/m3 negl.	(ARCONEL, 2016)
Internal Flow	Diesel	GJ 2,470,066	GJ/m3 0	(ARCONEL, 2016)
Internal Flow	Natural gas	GJ 25,225	GJ/m3 negl.	(ARCONEL, 2016)
Internal Flow	Oil	GJ 925,164	GJ/m3 0	(ARCONEL, 2016)
Internal Flow	Fuel for combustion	GJ 1,520,544	GJ/m3 0	(ARCH, 2016; Parra, 2015)
Internal Flow	Diesel	GJ 1,475,853	GJ/m3 0	(ARCH, 2016; Parra, 2015)
Internal Flow	Gasoline	GJ 44,690	GJ/m3 negl.	(ARCH, 2016; Parra, 2015)
Internal Fund	Power Capacity	kW 107,267	kW/m3 0.012	(ARCONEL, 2016; Asamblea Nacional, 2010)
Internal Fund	Human activity	hours 10,533,235	hours/m3 1	(MICSE, 2016)
External Inflow	Fluid	m3 17,384,787	m3/m3 2	(ARCH, 2016)
External Inflow	Raw water	m3 1,193,902	M3/m3 0	(ARCH, 2016)

Processor element	Label	Unit (extensive)	Unit (intensive)	Source
Medium oil production / moderate BSW				
External Outflow	Water for reinjection	m3 8,608,485	m3/m3 1	(ARCH, 2016)
External Outflow	Gas to burn	m3 184,500,504	m3/m3 21	(ARCH, 2016)
External Outflow	CO2	kg 250,368,078	kg/m3 29	(Parra, 2015)
Output	Medium oil	m3 8,776,302	m3 8,776,302	(ARCH, 2016)
Heavy oil production / high BSW				
Internal Flow	Electricity auto-consumption	kWh 358,785,629	kWh/m3 100	(ARCONEL, 2016)
Internal Flow	Fuel for generation	GJ 4,733,479	GJ/m3 1	(ARCONEL, 2016)
Internal Flow	Diesel	GJ 1,652,736	GJ/m3 1	(ARCONEL, 2016)
Internal Flow	Natural gas	GJ 2,206,094	GJ/m3 1	(ARCONEL, 2016)
Internal Flow	Oil	GJ 874,649	GJ/m3 0	(ARCONEL, 2016)
Internal Flow	Fuel for combustion	GJ 967,515	GJ/m3 0	(ARCH, 2016; Parra, 2015)
Internal Flow	Diesel	GJ 942,210	GJ/m3 0	(ARCH, 2016; Parra, 2015)
Internal Flow	Gasoline	GJ 25,304	GJ/m3 negl.	(ARCH, 2016; Parra, 2015)
Internal Fund	Power Capacity	kW 150,019	kW/m3 0.043	(ARCONEL, 2016; Asamblea Nacional, 2010)
Internal Fund	Human activity	hours 15,247,448	hours/m3 4	(MICSE, 2016)
External Inflows	Fluid	m3 23,440,806	m3/m3 7	(ARCH, 2016)
External Inflows	Raw water	m3 569,752	m3/m3 0	(ARCH, 2016)
External Outflows	Water for reinjection	m3 19,860,977	m3/m3 6	(ARCH, 2016)
External Outflows	Gas to burn	m3 53,025,635	m3/m3 15	(ARCH, 2016)
External Outflows	CO2	kg 306,809,266	kg/m3 86	(Parra, 2015)
Output	Heavy oil	m3 3,579,828	m3 3,579,828	(ARCH, 2016)

Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

Luego, los elementos estructurales se agrupan en dos *elementos funcionales*: extracción de petróleo medio y pesado. La Fig. 2-3 muestra cómo los procesadores estructurales se agrupan en procesadores funcionales en base al porcentaje de la función que está cubierto por una estructura dada.

Figura 2-3: Escalado de procesadores estructurales en funcionales



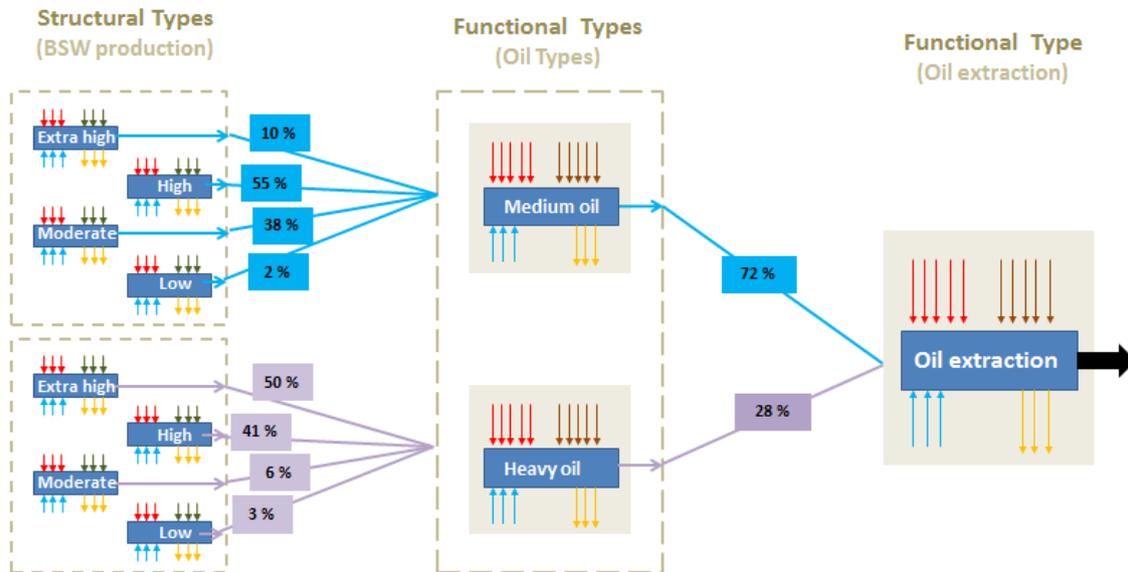
Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

2.6.3. Escalado al procesador de extracción funcional general

Los tres procesadores funcionales ahora se pueden ampliar formando un procesador general que caracteriza la extracción de petróleo en Ecuador, como se muestra en la Fig. 2-4, donde se agrega un paso adicional en el lado derecho. La Tabla 2-7 recoge los procesadores para cada tipo funcional (petróleo, medio y pesado), su peso relativo y el procesador final intensivo y extensivo para la extracción de petróleo. La caracterización intensiva del procesador se puede convertir en una extensiva multiplicando sus entradas y salidas intensivas por el factor de escala (en este caso la cantidad total de petróleo extraído). Los procesadores intensivos son útiles, ya que proporcionan información que puede ampliarse o reducirse y utilizarse como puntos de referencia para otros países y

estudios de casos, mientras que los procesadores extensivos proporcionan una visión general de las cantidades de flujos en el caso específico estudiado.

Figura 2-4: Escalado los procesadores funcionales a la extracción final de petróleo



Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

Este paso cuantitativamente simple es metodológicamente esencial, al escalar los procesadores desde datos estructurales de abajo hacia arriba, a grupos funcionales y a un procesador de extracción final, se puede evaluar simultáneamente las entradas y salidas generales del sector de extracción de petróleo y cómo las partes individuales de este sector contribuye al metabolismo, además al tipificar la extracción de petróleo en grupos funcionales se puede verificar fácilmente, la contribución relativa de cada tipo de extracción. A partir de los datos que se muestran en la Tabla 2-7, se puede distinguir que más del 70% del petróleo extraído en Ecuador corresponde a petróleo medio y el comportamiento de los flujos y fondos consumidos por diferente calidad de petróleo, muestra que la extracción de petróleo pesado presenta valores de mayor intensidad en términos de electricidad y de consumo de combustible.

Tabla 2-7: Construcción del procesador final de extracción de petróleo. Las cifras pueden no coincidir debido al redondeo

Processor Elements	Label	Unit	Medium oil	Heavy oil	% Medium oil	% Heavy oil	Intensive processor		Extensive processor	
							Unit	Value	Unit	Value
Internal Flow	Electricity auto-consumption	kWh/m ³	71	207	72	28	kWh/m ³	108	kWh	3,460,046,334
Internal Flow	Fuel for generation	GJ/ m ³	0.8	3	72	28	GJ/ m ³	1.3	GJ	41,490,482
Internal Flow	Fuel oil	GJ/ m ³	negl.	negl.	72	28	GJ/ m ³	negl.	GJ	193,461
Internal Flow	Diesel	GJ/ m ³	0.3	0.8	72	28	GJ/ m ³	.04	GJ	13,501,833
Internal Flow	Natural gas	GJ/ m ³	0.2	0.7	72	28	GJ/ m ³	0.3	GJ	10,772,120
Internal Flow	Oil	GJ/ m ³	0.3	1	72	28	GJ/ m ³	0.5	GJ	17,023,068
Internal Flow	Fuel for combustion	GJ/ m ³	0.2	0.3	72	28	GJ/ m ³	0.2	GJ	7,239,488
Internal Flow	Diesel	GJ/ m ³	0.2	0.2	72	28	GJ/ m ³	0.2	GJ	6,195,163
Internal Flow	Gasoline	GJ/ m ³	negl.	negl.	72	28	GJ/ m ³	negl.	GJ	270,924
Internal Flow	Natural gas	GJ/ m ³	negl.	negl.	72	28	GJ/ m ³	negl.	GJ	773,401
Internal Fund	Power Capacity	kW/ m ³	21.3	60	72	28	kW/m ³	0.032	kW	1,022,157
Internal Fund	Human activity	hours/ m ³	1.6	3.4	72	28	hours/ m ³	2	hours	67,470,065
External Inflow	Fluid	m ³ / m ³	4	14	72	28	m ³ / m ³	7	m ³	216,408,201
External Inflow	Raw water	m ³ / m ³	0.2	0.2	72	28	m ³ / m ³	0.2	m ³	7,199,532
External Outflow	Water for reinjection	m ³ / m ³	3	13	72	28	m ³ / m ³	6	m ³	184,497,642
External Outflow	Gas to burn	m ³ / m ³	36	13	72	28	m ³ / m ³	30	m ³	957,030,364
External Outflow	CO ₂	kg/ m ³	54	161	72	28	kg/ m ³	84	kg	2,666,028,197
Output	Oil production	m ³	23,044,086	8,797,248			m ³	3,1910,559		

Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

En términos de consumo y manejo de agua de formación, en la Fig. 2-4 se muestra que el 65% de petróleo medio tiene valores de BSW alto o extra alto, mientras que el 90% de petróleo pesado se extrae con los mismos niveles de BSW. Se refleja que la cantidad de agua necesaria para la inyección es considerablemente mayor para la extracción de petróleo pesado en comparación con petróleos medios.

El manejo de agua producida en la extracción de petróleo es un problema que tienen que lidiar los países productores, lo cual en términos de consumo de flujos y fondos son proporcionales al incremento de los volúmenes de agua producida y esto se ve reflejado en los impactos ambientales. Este tema será abordado a profundidad en el capítulo siguiente.

Este análisis multiescala permite predecir el efecto de diferentes combinaciones de tipologías de procesadores de nivel inferior, lo cual es útil para la construcción de escenarios, como veremos en la siguiente sección. Al observar el patrón metabólico de Ecuador para la extracción de petróleo en 2016, se diferencia que:

- En promedio, se necesitan más de 100 kWh de electricidad por cada metro cúbico de petróleo extraído;
- Se consumen aproximadamente 1,5 GJ de combustibles por cada metro cúbico de petróleo extraído: 1,3 GJ se utilizan para generar electricidad en el sitio, y el resto para la operación de maquinaria y movilización;
- En cuanto a los fondos, se necesitan aproximadamente 0,032 kW de capacidad de potencia por cada metro cúbico de petróleo extraído; y 2 horas de actividad humana, incluidos los trabajos directos (operativos) e indirectos (administrativos);
- Considerando el uso del agua, se extraen cerca de 7 metros cúbicos de fluido (agua, gas y petróleo) por cada metro cúbico de petróleo recuperado
- Se consumen 0,2 metros cúbicos de agua dulce por unidad de extracción, y se reinyectan casi 6 metros cúbicos de agua;
- Finalmente, el proceso de extracción de petróleo contribuye a las emisiones globales de CO₂ al producir cerca de 84 kg de CO₂ por metro cúbico de petróleo extraído.

Este marco es útil para dos propósitos. En primer lugar, nos permite tener una descripción detallada de los flujos y los fondos consumidos por el sector de extracción de petróleo de

Ecuador, identificando los elementos relevantes del sistema. Dada la falta de datos sobre este subproceso de la cadena de combustible, la descripción metabólica es valiosa para los análisis de energía. En segundo lugar, la caracterización de estos elementos en forma de procesadores permite verificar cómo la combinación de varios elementos del proceso de extracción de petróleo contribuye a su metabolismo final y cómo el cambio del peso relativo de los elementos afecta los flujos y fondos del procesador final en la extracción de petróleo, como se verá en la siguiente subsección.

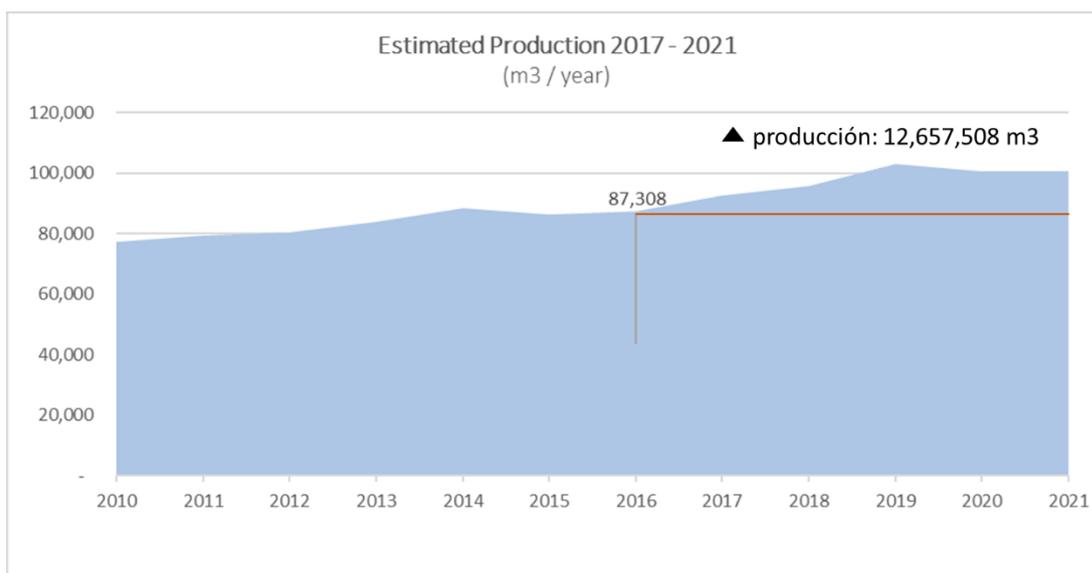
2.6.4. Construcción de escenarios: Incremento de producción proyectado a 5 años

El marco modular propuesto es particularmente útil cuando se trata de construir escenarios relevantes para las decisiones de política. Es importante tener en cuenta que, dentro de MuSIASEM, un escenario no pretende ser un modelo dinámico detallado que prediga lo que sucederá en el futuro.

Por el contrario, los escenarios son formas de verificar si existen restricciones en las políticas propuestas o en los estados futuros deseados al verificar la factibilidad y viabilidad de los cambios propuestos (Giampietro et al., 2014) y establecer relaciones sobre los perfiles esperados de diferentes flujos y fondos. De esta manera, el análisis de escenarios se realiza mirando patrones en lugar de enfocarse en una dimensión individual en ese momento.

En este caso, verificamos cómo cambiará el metabolismo de la extracción de petróleo de Ecuador si las tendencias actuales en la extracción de petróleo continúan durante los próximos cinco años y ceñidos a las principales líneas de política en la extracción del país, como se describió en la parte de introducción. La Fig.2-5 muestra el aumento del delta de producción que se espera en Ecuador en los próximos cinco años.

Figura 2-5: Aumento del delta de producción de Ecuador en los próximos cinco años



Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

Para la construcción del escenario, seguimos cuatro pasos: 1) Se identifica el crecimiento esperado en la extracción de petróleo en Ecuador durante los próximos cinco años, teniendo en cuenta el aumento de la productividad de los bloques del 2016 y el desarrollo de nuevos bloques exploratorios, como el caso de OGLAN B28, B79 y B83, se espera que la extracción de petróleo crezca en aproximadamente 20 millones de metros cúbicos (Secretaría de Hidrocarburos, 2016a). Para este escenario, solo se consideró el aumento en la producción de bloques que se encuentran en operación en 2016, lo que conduce a un aumento del delta de producción de más de 12 millones de metros cúbicos.

Para este escenario se considera que los niveles de producción del 2016 permanecen estáticos, por lo que el cambio en los elementos estructurales y funcionales solo se aplica al delta de la producción; 2) Los principales bloques asociados con el crecimiento esperado se identifican y se agrupan siguiendo la misma clasificación que en el diagnóstico (Fig. 2-3); 3) El paso anterior permite verificar cómo se cubrirá el aumento del delta de producción: se estima que el 35% del delta estará cubierto por petróleo mediano, con el incremento de la producción de bloques como Auca, Cuyabeno, Shushufindi y Sacha como los más representativos, mientras que el 65% restante estará cubierto por petróleo pesado, con bloques como ITT, Tarapoa y Villano; 4) Una vez identificados los elementos funcionales y sus componentes estructurales relativos,

podemos ampliar los procesadores que se encuentran en la sección anterior para verificar los flujos y fondos necesarios para aumentar el delta en la producción.

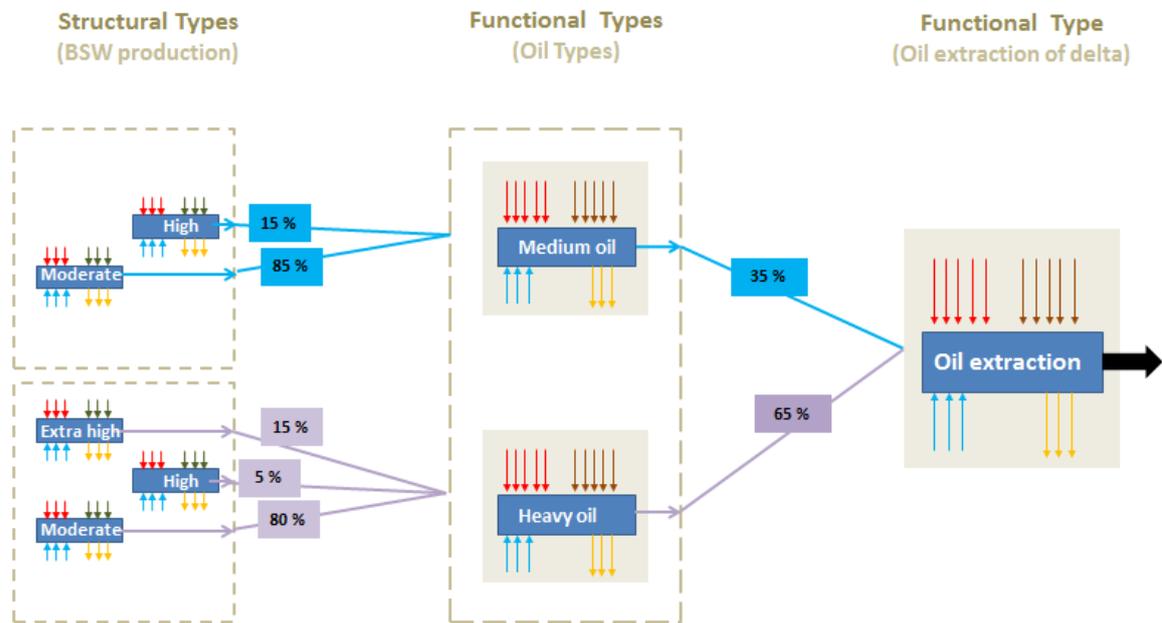
Tabla 2-8: Bloques identificados para cubrir el aumento del delta en la producción

BLOCK		Functional Processor	Structural Processor
#	Name	Oil Types °API	water production % BSW
0	-		Extra High (>90%)
1	PACOA	Ligh Oil	High (60-90%)
0	-	(>31°)	Moderate (30%-60%)
1	GUSTAVO GALINDO		Low (<30%)
2	BERMEJO,EDEN YUTURI		Extra High (>90%)
7	SINGUE,SHUSHUFINDI, CUYABENO,PALANDA,MDC, PALO AZUL,COCA PAYAMINO	Medium Oil	High (60-90%)
5	SACHA,PUCUNA,LAGO AGRIO,PBHI,AUCA	(22° - 31°API)	Moderate (30%-60%)
1	OCANO - PEÑA BLANCA		Low (<30%)
5	TARAPOA,YURALPA,VILLANO,I RO,TIVACUNO		Extra High (>90%)
7	PINDO,31,INDILLANA,ARMADIL LO,TIGUINO,NAMTU,HORMIGU ERO,	Heavy Oil (<22°API)	High (60-90%)
3	VINITA,PUMA,ITT		Moderate (30%-60%)
1	ENO-RON		Low (<30%)

Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

La Fig. 2-6 muestra cómo los factores de escala utilizados en el diagnóstico cambian en este escenario. Es importante tener en cuenta que esto solo se aplica al aumento del delta de extracción, y no a la extracción total durante los próximos cinco años. Se puede ver que la extracción de petróleo medio se producirá con una producción de BSW alta y moderada.

Figura 2-6: Escalado de procesadores para el aumento del delta de producción



Fuente: (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

Al cambiar el peso relativo de los procesadores, se genera un procesador simulado requerido para el delta producción (Tabla 2-8). Se puede ver que, debido a un cambio del patrón hacia la extracción de petróleo pesado, y el cambio en los elementos estructurales del petróleo pesado y mediano, el procesador integral simulado es diferente al del procesador integral de extracción de petróleo actual. Esta es la razón por la cual la desagregación en los niveles más bajos es importante al construir escenarios, ya que los análisis simples de entrada / salida ignoran los cambios que tienen lugar en los diferentes niveles.

Se observa que, debido al cambio en el perfil de los elementos estructurales, el procesador de extracción para el aumento del delta de producción consume menos cantidad de agua, combustibles y electricidad que el procesador de extracción actual. Esto puede parecer contradictorio, ya que el 65% del delta de producción está cubierto por petróleo pesado, sin embargo, la disminución se debe al cambio en las contribuciones estructurales del petróleo pesado: solo el 20% está cubierto por producción del BSW alto y extra alto. En general, los bloques de extracción más nuevos tienden a ser más eficientes y están asociados con una menor producción de BSW; es por eso que el aumento del delta, que

se cubrirá mediante la explotación de nuevos pozos en los bloques, consumirá en promedio menor cantidad de flujos y fondos que la extracción actual.

Es importante tener en cuenta que solo estamos hablando del delta incremental. Para tener una visión general completa de cómo cambiará el proceso de extracción, debemos evaluar cómo los procesadores de los elementos estructurales que se utilizan actualmente cambiarán con el tiempo. Se espera que a medida que los bloques envejecen, su estructura también cambie, avanzando hacia una mayor producción de BSW. Por lo tanto, se espera que la mejora en la extracción del petróleo en el delta, en términos del perfil de insumos requeridos por unidad de producción, sea más que compensada en términos negativos por la reducción progresiva de la calidad de los bloques en producción. Este aspecto es crucial para futuros estudios.

Analizando únicamente el aumento del delta de la producción durante el período de cinco años, se observa que el crecimiento del petróleo extraído requerirá una capacidad de energía adicional de 800 MW, casi 40 millones de horas de actividad humana, más de 25 TJ de combustibles y más de 1 millón de MWh de electricidad. Sin embargo, esta información no es relevante sin evaluar el efecto que tendrá el envejecimiento de los bloques en la carga base de producción, y necesita ser interconectado con los Análisis de Criterios Múltiples (ACM) para poder utilizarse en la toma de decisiones. Ambos aspectos se abordarán en el próximo capítulo.

2.7. Discusión y conclusiones

En este artículo, se propuso un marco metodológico para describir el proceso de extracción de petróleo, utilizando MuSIASEM y el concepto de procesadores para analizar la relación entre los elementos funcionales y estructurales del sistema energético para luego ser aplicado al sistema de energía del Ecuador. Como la extracción en Ecuador no es muy relevante a nivel mundial como en otros países latinoamericanos, podríamos centrarnos en una escala más pequeña mediante la recopilación de datos detallados de bloques de extracción individuales. Sin embargo, a pesar de la pequeña contribución relativa de Ecuador al sistema mundial de extracción de petróleo, el estudio de caso elegido no es irrelevante: en primer lugar, muestra que con este método es posible generar información importante para las políticas, por ejemplo, a nivel nacional la extracción de

petróleo está cobrando cada vez más importancia en las políticas y perspectivas económicas de Ecuador, y los datos presentados aquí pueden ayudar a tomar decisiones informadas, por ejemplo, sobre los fondos y flujos necesarios para materializar el aumento en la extracción de petróleo. En segundo lugar, el conjunto integrado de relaciones de procesadores construidas de abajo hacia arriba con datos de Ecuador puede ajustarse y aplicarse a otros países, mediante el uso de diccionarios que describen las características de los procesadores en diferentes contextos, ya que las tecnologías y métodos de extracción de petróleo pueden generalizarse.

Los resultados para Ecuador mostraron que actualmente el petróleo mediano domina el mercado, y que en este momento el proceso de extracción en promedio requiere, por metro cúbico de petróleo extraído, más de 100 kWh de electricidad, 1,5 GJ de combustibles, 3 kW de capacidad de potencia, 2 horas de actividad humana y produce 6,2 metros cúbicos de agua de formación, proceso de extracción también genera, por metro cúbico de petróleo extraído, cerca de 85 kg de emisiones de CO₂.

El paquete de indicadores que proporciona el enfoque permite tener una evaluación integrada del desempeño del proceso investigado en forma de análisis de criterios múltiples. Por ejemplo: (i) el perfil de los insumos de los portadores de energía (electricidad y combustibles) son relevantes para calcular el Retorno de Energía de la Inversión Energética (mapeando tanto la velocidad de agotamiento del stock de recursos como las emisiones de CO₂ por red suministro); (ii) el requisito de capacidad de energía (tecnología) es un indicador relevante para evaluar los costos económicos fijos; (iii) el requerimiento de mano de obra es relevante tanto para evaluar los costos económicos como para la oportunidad de empleo; (iv) la información sobre las emisiones de agua dulce y CO₂ es relevante para un análisis del impacto ambiental. El trabajo futuro se centrará en organizar esta información en forma de un Análisis de Criterios Múltiples para ampliar las discusiones de política.

El análisis del escenario propuesto mostró que la extracción de nuevos recursos petroleros en Ecuador cambiará de mediano a pesado, pero este cambio se realizará principalmente en nuevas estructuras, lo cual producirá menos (BSW) en el proceso durante el periodo analizado. Esto reducirá el requerimiento de insumos por unidad de petróleo producido. Sin embargo, para proporcionar una visión general completa del efecto general sobre el

metabolismo de extracción de petróleo de Ecuador, se debe introducir una dimensión de tiempo en el análisis, verificando cómo los procesadores de las estructuras actuales de extracción de petróleo cambiarán a medida que envejece el sistema de extracción en términos de flujos y fondos consumidos. Es conocido, en general, que los bloques más antiguos consumen más recursos para su extracción, lo cual se demuestra al analizar el procesador simulado que se enfoca en el delta de producción y que está basado en la explotación de nuevas estructuras, cuyos consumos de flujos son menores en términos de energía y agua que el procesador real del Ecuador en 2016.

2.8. Referencias

- Ali, B., Kumar, A., 2017. Life cycle water demand coefficients for crude oil production from five North American locations. *Water Res.* 123, 290–300. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.076>
- Aragão, A., Giampietro, M., 2016. An integrated multi-scale approach to assess the performance of energy systems illustrated with data from the Brazilian oil and natural gas sector. *Energy* 115, 1412–1423. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.058>
- ARCH, 2016. Bases estadísticas del sector petrolero [WWW Document].
- ARCONEL, 2016. Bases estadísticas del sector eléctrico.
- Asamblea Nacional, 2010. Proyecto de Ley Reforma a la Ley de Hidrocarburos Tr. 87580.
- Ayres, R.U., 1995. Life cycle analysis: A critique. *Resour. Conserv. Recycl.* 14, 199–223. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00017-D](https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00017-D)
- Brandt, A.R., Dale, M., Barnhart, C.J., 2013a. Calculating systems-scale energy efficiency and net energy returns: A bottom-up matrix-based approach. *Energy* 62, 235–247. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.054>
- Brandt, A.R., Englander, J., Bharadwaj, S., 2013b. The energy efficiency of oil sands extraction: Energy return ratios from 1970 to 2010. *Energy* 55, 693–702. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.080>
- Bravo, E., 2007. Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad. *Front. Comunes y Asoc. Ecológica St. Tomás* 1–36.
- Chang, Y., Huang, R., Ries, R.J., Masanet, E., 2014. Shale-to-well energy use and air pollutant emissions of shale gas production in China. *Appl. Energy* 125, 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.039>

- Chen, Y., Feng, L., Wang, J., Höök, M., 2017. Emergy-based energy return on investment method for evaluating energy exploitation. *Energy* 128, 540–549. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.058>
- Cordes, E.E., Jones, D.O.B., Schlacher, T.A., Amon, D.J., Bernardino, A.F., Brooke, S., Carney, R., DeLeo, D.M., Dunlop, K.M., Escobar-Briones, E.G., Gates, A.R., G?nio, L., Gobin, J., Henry, L.-A., Herrera, S., Hoyt, S., Joye, M., Kark, S., Mestre, N.C., Metaxas, A., Pfeifer, S., Sink, K., Sweetman, A.K., Witte, U., 2016. Environmental Impacts of the Deep-Water Oil and Gas Industry: A Review to Guide Management Strategies. *Front. Environ. Sci.* 4, 58. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00058>
- Court, V., Fizaine, F., 2017. Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions. *Ecol. Econ.* 138, 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.03.015>
- Diaz-Maurin, F., Giampietro, M., 2013. A “Grammar” for assessing the performance of power-supply systems: Comparing nuclear energy to fossil energy. *Energy* 49, 162–177. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.014>
- EP Petroecuador, 2012. Resolución Directorio N°. DIR-EPP-01-2012-01-16 de 16 de enero de 2012.
- Fontaine, G., 2003. *Petróleo y desarrollo sostenible en Ecuador*. FLACSO, Sede Ecuador, Quito, Ecuador.
- Giampietro, M., 2018. Anticipation in Agriculture, in: *Handbook of Anticipation*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31737-3_23-1
- Giampietro, M., 2003. Multi-Scale Integrated Analysis of Agro-ecosystems, *Crop Science, Advances in agroecology*. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.0003br>
- Giampietro, M., Diaz-Maurin, F., 2014. The Energy Grammar, in: Giampietro, M., Aspinall, R.J., Ramos-Martin, J., Bukkens, S.G.F. (Eds.), *Resource Accounting for Sustainability: The Nexus between Energy, Food, Water and Land Use*. Routledge, Abingdon, pp. 90–115.
- Giampietro, M., Mayumi, K., 2000. Multiple-scale integrated assessments of societal metabolism: Integrating biophysical and economic representations across scales. *Popul. Environ.* 22, 155–210.
- Giampietro, M., Mayumi, K., Ramos-Martin, J., 2013. Two conceptual tools for Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM):

- ‘Multi-purpose grammars’ and ‘impredicative loop analysis,’ Beyond Reductionism: A Passion for Interdisciplinarity. <https://doi.org/10.4324/9780203112281>
- González-López, R., Giampietro, M., 2018. Relational analysis of the oil and gas sector of Mexico: Implications for Mexico’s energy reform. *Energy* 154, 403–414. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.134>
- González-López, R., Giampietro, M., 2017. Multi-Scale Integrated Analysis of Charcoal Production in Complex Social-Ecological Systems. *Front. Environ. Sci.* 5. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00054>
- Hollanda, L., Castello Branco, R., Lins, C., Morais, R., 2016. The Geopolitics of Oil and Gas: The Role of Latin America. *Energy Geopolit. Role Lat. Am.* 40.
- Horne, R., Grant, T., Verghese, K., 2009. *Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects*. CSIRO Publishing, Clayton South, Australia.
- International Energy Agency, 2017. *World Energy Balances 2017*.
- Lazzaroni, E.F., Elsholkami, M., Arbiv, I., Martelli, E., Elkamel, A., Fowler, M., 2016. Energy infrastructure modeling for the oil sands industry: Current situation. *Appl. Energy* 181, 435–445. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.072>
- MICSE, 2016. Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. *Agenda Nacional de la Energía 2016-2040* 80.
- Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2016. *Balance Energético Nacional*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ministerio de Comercio Exterior, 2016. *Informe de Gestión 2016*. Quito, Ecuador.
- Murphy, D.J., Hall, C.A.S., 2011. Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1219, 52–72. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05940.x>
- Nimana, B., Canter, C., Kumar, A., 2015. Energy consumption and greenhouse gas emissions in the recovery and extraction of crude bitumen from Canada’s oil sands. *Appl. Energy* 143, 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.024>
- Owen, N.A., Inderwildi, O.R., King, D.A., 2010. The status of conventional world oil reserves-Hype or cause for concern? *Energy Policy* 38, 4743–4749. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.02.026>
- Parra, R., 2015. Energy demand in the oil extraction system in Ecuador, in: Kordas, O., Ulgiati, S., Schnitzer, H., Casazza, M., Braunegg, S. (Eds.), *Energy and Urban Systems. Proceedings of the 9th Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies.”* Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, p. 51.

- Pastore, G., Giampietro, M., Mayumi, K., 2000. Societal metabolism and multiple-scale integrated assessment: Empirical validation and examples of application. *Popul. Environ.* 22, 211–254.
- Peralta-Ruiz, Y., González-Delgado, A.-D., Kafarov, V., 2013. Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis. *Appl. Energy* 101, 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.065>
- Petroamazonas, 2016. Oil production reports in blocks.
- Petroecuador, 2016. Información estadística [WWW Document].
- Poddar, T., Jagannath, A., Almansoori, A., 2017. Use of reactive distillation in biodiesel production: A simulation-based comparison of energy requirements and profitability indicators. *Appl. Energy* 185, 985–997. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.054>
- Rajagopal, D., Sexton, S.E., Roland-Holst, D., Zilberman, D., 2007. Challenge of biofuel: filling the tank without emptying the stomach? *Environ. Res. Lett.* 2, 044004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/044004>
- Rathmann, R., Szklo, A., Schaeffer, R., 2010. Land use competition for production of food and liquid biofuels: An analysis of the arguments in the current debate. *Renew. Energy* 35, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.025>
- Ripa, M., Giampietro, M., 2017. Report on Nexus Security using Quantitative Story-Telling MAGIC (H2020–GA 689669) Project Deliverable 4.1. Bellaterra.
- Ripoll-Bosch, R., Giampietro, M., 2017. D4.2 Report on EU socio-ecological systems (MAGIC Nexus project). Bellaterra.
- Rodríguez, G.A., 1998. Petróleo y conflictos sociambientales: El caso de Pastaza, bloque número 10, in: *LASA XXI International Congress*. Chicago.
- Secretaria de Hidrocarburos, 2016a. Estadística Hidrocarburífera de Petróleo Crudo.
- Secretaria de Hidrocarburos, 2016b. Average National Oil Production-Estimates 2016-2030.
- Ulanowicz, R.E., 1986. *Growth and Development: Ecosystem Phenomenology*. Springer, New York.
- Vallejo, M.C., Burbano, R., Falconí, F., Larrea, C., 2015. Leaving oil underground in Ecuador: The Yasuní-ITT initiative from a multi-criteria perspective. *Ecol. Econ.* 109, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.11.013>

- Velasco-Fernandez, R., Ramos-Martin, J., Giampietro, M., 2015. The energy metabolism of China and India between 1971 and 2010: Studying the bifurcation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41, 1052–1066. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.065>
- Vidic, R.D., Brantley, S.L., Vandenbossche, J.M., Yoxtheimer, D., Abad, J.D., 2013. Impact of Shale Gas Development on Regional Water Quality. *Science* (80-.). 340, 1235009–1235009. <https://doi.org/10.1126/science.1235009>
- World Energy Council, 2016. World Energy Resources. World Energy Council. Rep. 1, 468. https://doi.org/http://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf

Capítulo III

Explorando las implicaciones ambientales mientras envejecen los campos de petróleo mediante análisis relacional

Este capítulo se basa en la descripción del artículo científico publicado en la revista Science of the Total Environment en 2020 y la información que se presenta en este trabajo corresponde al período 1972 a 2018³.

3.1. Resumen

En este capítulo se complementa el aprendizaje sobre el metabolismo de la fuente primaria de energía y se presenta un estudio metodológico alternativo y novedoso basado en el análisis relacional para evaluar el desempeño de la extracción de petróleo convencional en cualquier momento del tiempo y sus implicaciones ambientales bajo el nexo energía-agua. Se considera al sistema energético como una red metabólica que integra varios factores relevantes para los procesos técnicos, económicos y ambientales, evitando así algunas de las simplificaciones inherentes de los enfoques convencionales que evalúan la calidad de los recursos primarios, como el análisis económico de costo-beneficio y la tasa de retorno energético, EROI por sus siglas en inglés (energy return on investment).

El análisis relacional distingue entre elementos funcionales (nocionales) y estructurales (tangibles) en la red metabólica, lo que permite una caracterización y geolocalización simultánea del proceso de explotación en diferentes escalas y dimensiones de análisis. Los aspectos importantes del enfoque, complementa el trabajo del capítulo 2 y se ilustran con datos del sector petrolero ecuatoriano en el período de 1972-2018, demostrando que al establecer una relación entre las características de los campos petroleros explotados

³ DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142371>

(tipo de petróleo, edad del campo y BSW) y los inherentes al proceso de extracción (requerimiento de los portadores de energía, mano de obra, agua dulce, capacidad de generación de energía, emisión de GEI y producción, recirculación y depósito del agua de formación), se pueden anticipar cambios en el rendimiento del sistema de extracción de petróleo en diferentes puntos en el *tiempo y espacio*.

De igual forma la metodología permite, integrar al procesador varios patrones metabólicos para analizar los impactos ambientales en términos biofísicos de escasez y decremento de la calidad del recurso y sus implicaciones de sumidero neto de energía, emisión de GEI y eliminación de agua contaminada. Finalmente se muestra las bondades del método a partir de la construcción de análisis diacrónico y sincrónico, además de un análisis de criterios múltiples para enriquecer la discusión en diferentes esferas del sector energético.

3.2. Introducción

La transición de las fuentes de energía fósiles al aprovechamiento de recursos renovables está en la agenda política de los gobiernos de todo el mundo (Comisión Europea, 2019; Naciones Unidas, 2019). La escala y el ritmo de la transición son factores importantes a tener en cuenta para lograr esta ambición política (Solé et al., 2018). De hecho, la transición de energía limpia no es cuestión simplemente de sustituir fuentes de energía primaria no renovables por renovables, sino que requiere de enormes inversiones en energía y materias primas para permitir el proceso de transición (por ejemplo, para la construcción de capacidad instalada de energía renovable e infraestructura relacionada, reemplazo de la flota de automóviles y otras formas de capacidad de potencia). Las inversiones en el desarrollo de las fuentes de energías alternativas tendrán que competir por los recursos con otros sectores económicos, como la producción de alimentos y manufactura de bienes y servicios que están directamente vinculados al mantenimiento del nivel de vida de las sociedades.

Por lo tanto, cumplir con este aumento en el requerimiento de energía durante el período de transición (además del que implica el crecimiento de la población) es un desafío importante, ya que la calidad de las fuentes de energía fósil restantes está disminuyendo rápida y progresivamente (Mohr et al., 2015). Existe poca información disponible sobre

la cantidad y el ritmo de extracción de la energía neta que podría obtenerse de las fuentes de energía fósil restantes y de las consecuencias del envejecimiento de los campos de petróleo en el medio ambiente. Si bien la relación energía-GEI ha llamado recientemente la atención de la comunidad científica (Capellán-Pérez et al., 2019; Gavenas et al., 2015; Masnadi y Brandt, 2017; Sers y Victor, 2018), el nexo energía-agua de la explotación petrolera convencional ha sido ampliamente ignorada (McIntosh y Ferguson, 2019). Por lo tanto, es importante desarrollar herramientas analíticas que sean capaces de caracterizar la calidad de las fuentes primaria de energía en relación con su desempeño ambiental y los cambios esperados en el tiempo.

Las evaluaciones de la calidad de las fuentes primarias de energía fueron realizadas tradicionalmente por empresas privadas y tienden a centrarse en el análisis económico de costo-beneficio (ACB) y la eficiencia de la producción (Giampietro et al., 2013). El enfoque específico en el análisis económico refleja el interés de la industria energética en identificar inversiones prometedoras en relación con sus esfuerzos de I + D. Sin embargo, los intereses ya no se limitan a la comunidad de inversores privados, sino que existe una creciente preocupación pública por el medio ambiente, por lo cual es una reconsideración del conjunto de criterios adoptados para complementar el análisis de costo-beneficio del proceso de explotación con información relacionada a otras narrativas relevantes, como el suministro neto de energía, las emisiones de GEI, la eliminación/reutilización de las aguas residuales en el proceso de extracción y requisitos laborales. De hecho, un análisis efectivo también debe incluir los costos y beneficios biofísicos, ambientales y sociales que la explotación de las fuentes primarias de energía conlleva para la sociedad, sin reducir el análisis cuantitativo a variables monetarias.

En la década de 1980, basándose en la idea del análisis de energía neta⁴ (Maddox, 1978), (Hall et al., 1981) propuso una justificación heurística para evaluar la calidad de las fuentes primaria de energía en relación con su utilidad para la sociedad bajo el nombre de Tasa de Retorno Energético, EROI por sus siglas en inglés (Energy Return On Invested). Este enfoque todavía es ampliamente utilizado, no solo para evaluar las fuentes de energías fósiles, sino también para analizar el rendimiento de las fuentes de energías

⁴ El concepto de energía neta se deriva de la teoría de alimentación óptima en ecología. Según esta teoría, los organismos adoptarán estrategias de búsqueda de alimento que proporcionen el máximo rendimiento energético de la inversión energética.

renovables (Cleveland, 2005; Cleveland et al., 1984; Cleveland y O'Connor, 2011; Court y Fizaine, 2017; Gagnon et al., 2009; Gever et al., 1991; Heun y de Wit, 2012; Kittner et al., 2016; Kubiszewski et al., 2010; Mansure y Blankenship, 2010). No obstante, a pesar de los intentos de estandarización (Mulder y Hagens, 2008; Murphy et al., 2011), el EROI presenta deficiencias en su implementación como resultado de las discrepancias en la definición de los límites del sistema (problema de truncamiento), en los ajustes de calidad por tipo de energía y en cuestiones de procedimiento sobre la cadena de suministro (conversión energía-economía, es decir, dilemas de producción conjunta) (Giampietro et al., 2013; Hall et al., 2011). De igual forma el EROI no caracteriza el nivel de potencia ni el tamaño de los flujos. Por ejemplo, el valor será el mismo para un proceso que tiene 1 MJ de entrada y 10 MJ de salida que para un proceso que tiene 1 GJ de entrada y 10 GJ de salida. Esta diferencia es esencial tanto para determinar la presión sobre la fuente de energía primaria (velocidad de agotamiento de una reserva) como para el requisito de capacidad de energía que se utilizará en el proceso de explotación y sus impactos ambientales.

De hecho, la lógica del análisis de energía neta se vuelve esquivada cuando se aplica a una operación específica (por ejemplo, extracción de petróleo) que forma parte de una red de transformaciones más grande y más compleja en la que intervienen diferentes tipos de costos y beneficios.

El trabajo propone una metodología alternativa al EROI para evaluar el desempeño de la explotación de las fuentes primarias de energía, basándose en la misma lógica del análisis de energía neta, pero implementado con análisis relacional e incluyendo también los flujos de agua y GEI, aplicados al sistema de extracción de petróleo del Ecuador. El análisis relacional se desarrolló dentro del campo de los sistemas complejos y fue introducido por primera vez en la biología teórica por Rashevsky (1954) y luego desarrollado por Rosen (2012, 2005) dentro del campo de la teoría de categorías. El marco matemático de Rosen ha sido refinado por Louie (Louie, 2017, 2013, 2009) y recientemente se ha propuesto el análisis relacional como un marco analítico para evaluar el nexo de recursos (Cabello et al., 2019; Serrano-Tovar et al., 2019) y para apoyar la narración cuantitativa sobre los temas de sostenibilidad (Cadillo-Benalcazar et al. 2020; Renner y Giampietro, 2020).

El objetivo de este capítulo es demostrar la utilidad del análisis relacional para evaluar las implicaciones ambientales (emisión de GEI, eliminación de agua producida por el petróleo) por el envejecimiento de las fuentes de petróleo convencionales a través del análisis diacrónico (series temporales) y sincrónico (estructura de edad), así como para generar puntos de referencia, mediante el uso de procesadores unitarios, para caracterizar tipologías de reservas de petróleo y para tratar con datos faltantes. Finalmente, el documento muestra que el análisis relacional puede proporcionar un rico espacio de información para informar políticas relacionadas con la transición de energía limpia y el medio ambiente.

3.3. Metodología: Implementación del análisis relacional para la extracción de petróleo

3.3.1. Conceptos básicos sobre el análisis relacional

En el análisis relacional, el sistema energético explotado se considera como una red metabólica de elementos estructurales (tangibles) y funcionales (nocionales) que están relacionados entre sí a través de relaciones esperadas determinadas por los perfiles esperados de entradas y salidas. El análisis relacional utiliza las cuatro causas aristotélicas para identificar los elementos estructurales y funcionales de los sistemas (Giampietro, 2018; Giampietro y Renner, 2020; Renner et al., 2020). El término “esperado” se refiere a las relaciones sobre los elementos estructurales que se combinan para expresar un elemento funcional (por ejemplo, una ruta secuencial en la que los campos de extracción, oleoductos, refinerías y estaciones de servicio pueden considerarse juntos como un elemento funcional llamado “sistema de suministro de gasolina”), así como las características técnicas de los elementos estructurales individuales (por ejemplo, los puntos de referencia técnicos de un campo de petróleo o un oleoducto).

La información sobre los coeficientes técnicos asociados con las relaciones de entrada/salida se atañe a la causa formal, es decir, el modelo de la tecnología asociada, mientras que la causa material caracteriza los aspectos tangibles de la realización del proceso (la naturaleza de las entradas y salidas en relación con la composición de los elementos del fondo). Los datos asociados con la realización de los aspectos funcionales

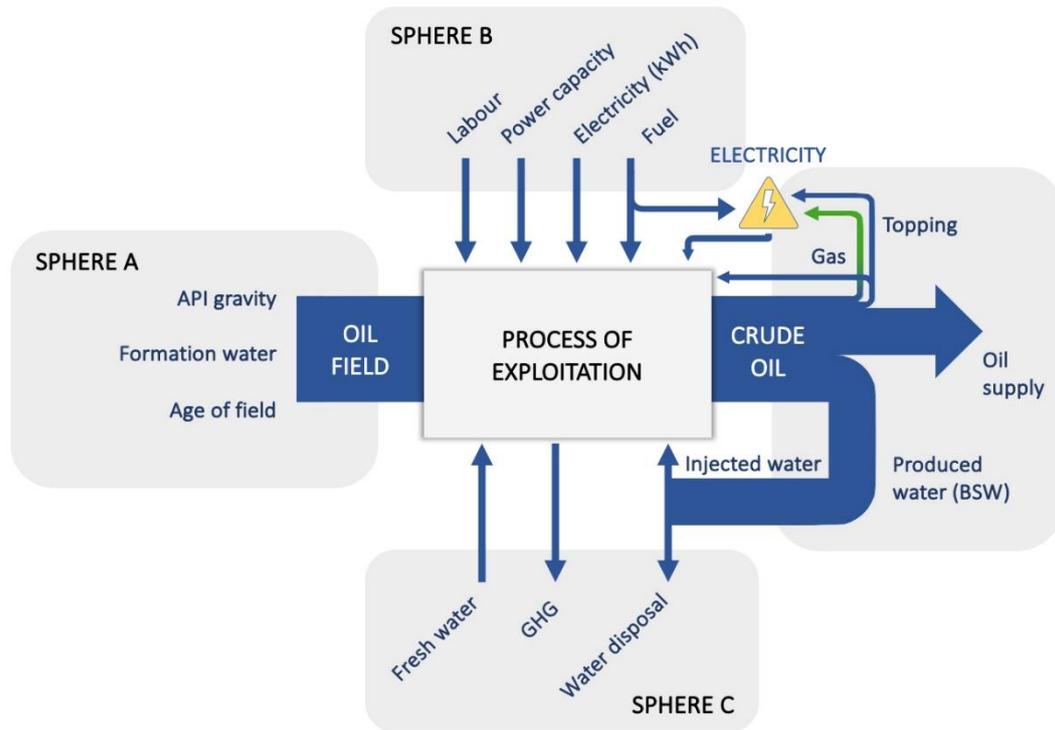
de la red se refiere a la causa eficiente, es decir, cómo el sistema está expresando una función determinada (por ejemplo: el suministro de petróleo). La causa material, formal y eficiente se justifica por la existencia de una causa final del sistema, es decir, su propósito: por qué el sistema se ha creado en primer lugar (por ejemplo, proporcionar a la sociedad combustible para el transporte).

Complementando lo descrito en el capítulo 2, los conceptos de procesador metabólico y gramática, desarrollados dentro de esta lógica, son clave para la implementación del análisis cuantitativo. El concepto de procesador metabólico se utiliza para describir las características de cualquier elemento estructural (por ejemplo, campos petroleros específicos) o funcionales (por ejemplo, suministro de petróleo ligero) del sistema en términos de entradas y salidas esperadas. Mientras el procesador metabólico puede ver una función de producción biofísica extendida, el concepto de gramática se utiliza para describir las relaciones entre los diversos elementos estructurales y funcionales del sistema. Las gramáticas relacionan la información que se refiere a la causa formal (las características metabólicas de los elementos estructurales) con la información que se refiere a la causa eficiente (las características metabólicas observadas al combinar elementos estructurales de nivel inferior en una unidad funcional) (Giampietro, 2018). Más detalles sobre esta aplicación de la teoría del análisis relacional están disponibles en (Giampietro, 2018; Giampietro y Renner, 2020; Renner et al., 2020).

3.3.2. Definición del procesador metabólico (a nivel de campo de petróleo)

La definición del procesador metabólico es un paso clave e implica la selección de las diversas entradas y salidas consideradas en el análisis, este trabajo refina la estructura realizada en el capítulo anterior e integra los lazos internos (internal loop) de energía y agua que se recircula dentro del proceso de explotación, además se logra el detalle sobre flujos relevantes para el análisis de impacto ambiental sobre: el agua de formación que es producida, recirculada y desechada, y la emisión de GEI por la quema de gas asociado a la extracción y consumo de combustibles producidos en el interior y los que ingresan por fuera del sistema. Para el estudio de caso ilustrativo de Ecuador, se enfoca en los vínculos entre diferentes tipos de atributos en cuatro esferas distintas de análisis relevantes para la formulación de políticas en relación con la extracción de petróleo (Figura 3-1). Estos cuatro atributos/esferas se describen a continuación:

Figura 3-1: Representación de la extracción de petróleo a partir del procesador metabólico (función de producción biofísica extendida)⁵



Fuente: Parra, Bukkens & Giampietro; 2018

De acuerdo a la Figura 3-1, los atributos elementales del procesador tienen las siguientes características:

Sphere A: Características de la fuente primaria de energía explotada. En el caso del petróleo crudo, factores como la viscosidad, la ubicación y la profundidad del stock y la cantidad relativa de agua de formación afectan el rendimiento del proceso de explotación y deben tenerse en cuenta (asociados con la identidad del procesador metabólico) para estudiar posibles cambios futuros, al igual que la edad de los campos de petróleo. Las fuentes de energía primaria se derivan de la biosfera (generadas por procesos más allá del control humano) y sus características determinan la VIABILIDAD de la explotación en el lado de la oferta (límites externos potenciales).

⁵ Abreviaturas: API = gravedad del Instituto Americano del Petróleo; BSW = sedimento básico y agua; GEI = emisiones de gases de efecto invernadero.

Sphere B: El perfil de las entradas externas requeridas de la tecnosfera para el proceso de explotación. Esto incluye el nivel de capacidad de potencia de la tecnología seleccionada de extracción, insumos de mano de obra e insumos externos de electricidad y combustibles no obtenidos del ciclo interno de explotación. Las entradas externas se registran y procesan por separado, es decir, no se agregan utilizando valores monetarios o índices de calidad de energía. Proporcionan información relevante para estudiar la VIABILIDAD del sistema en términos de las limitaciones económicas y técnicas asociadas con los procesos bajo control humano. Se debe tener en cuenta que, en el caso de Ecuador, el uso de electricidad externa de la red comenzó a finales del 2017 y representó menos del 5% en el último año de análisis de este estudio; Los combustibles externos incluyen principalmente diésel y gasolina.

Sphere C: El intercambio de entradas y salidas con el entorno natural (biosfera) en el proceso de explotación, incluyen flujos como agua, gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes y representan las presiones ambientales asociadas con la operación de extracción de petróleo. De hecho, un campo petrolero no solo produce petróleo, sino también hidrocarburos gaseosos y agua. El agua producida por petróleo comprende agua de formación (fósil) y posiblemente agua inyectada en la formación como parte del proceso de exploración y / o extracción (recuperación mejorada). El agua producida contiene cantidades variables de productos químicos, metales y sedimentos y su eliminación es una preocupación ambiental y de salud importante (AlAnezi et al., 2013; Campos y Nonato, 2018; San Sebastián y Hurtig, 2004; Yusta-García et al., 2017, para el caso de Ecuador, el agua producida se refiere principalmente al agua de formación extraída, mientras que la emisión de GEI se refiere al resultado de la quema de gas no deseado en el proceso de extracción y al uso in situ de combustible para maquinaria pesada y generación de electricidad.

Otros intercambios con el medio ambiente se refieren al agua dulce (por ejemplo, agua de río) que ingresa al sistema para su uso en el proceso de extracción (agua de reposición, sistemas de enfriamiento, sistemas contra incendios, etc.). Las entradas y salidas en esta esfera se relacionan con las presiones ambientales asociadas con el proceso de explotación, que pueden afectar los ecosistemas involucrados, y son relevantes para estudiar la FACTIBILIDAD del proceso tanto en el suministro (requisito de agua dulce) como en el lado del sumidero (emisión de GEI, eliminación de agua producida).

Sphere D: Los lazos internos (internal loop) de energía y agua dentro del proceso de explotación se refiere: a) la fracción de la producción de petróleo que se usa directamente para la generación de energía en el proceso de explotación mediante el uso de unidades de refinación básica “topping”, b) los hidrocarburos gaseosos producidos que se usan para la generación de electricidad, c) la fracción del agua producida que se reinyecta para mejorar la recuperación de petróleo. Esta esfera de análisis trata los aspectos técnicos del proceso de explotación. Se debe tener en cuenta que, en el caso de Ecuador, el circuito interno de agua es insignificante. Prácticamente toda el agua producida se elimina en el medio ambiente a través de pozos de inyección que llevan el agua a reservorios en el subsuelo (sphere C).

Dadas las diferencias potenciales en la calidad de las formas de energía, es importante distinguir entre: a) portadores de energía secundaria de diferentes formas (por ejemplo, electricidad versus calor de proceso); y b) los portadores de energía que se generan en el sitio como parte del bucle interno (sphere D en la Figura 3-1) y los transportados desde afuera (externo, sphere B en la Figura 3-1). La capacidad de potencia (tamaño de la inversión tecnológica) requerida para la explotación se refiere a todo el complejo de portadores de energía secundaria utilizados, independientemente de su forma y si se producen localmente o se derivan de otros lugares.

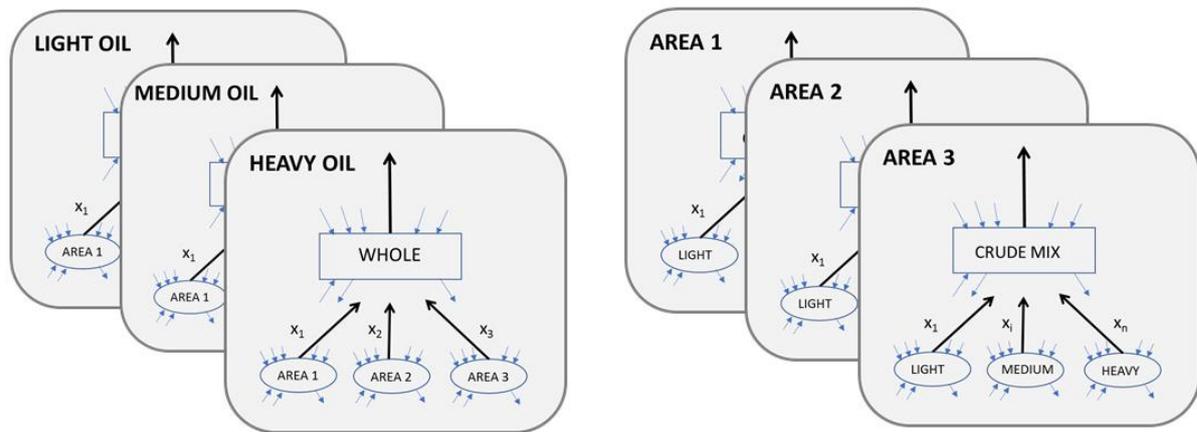
3.3.3. Definición de gramáticas y diferentes lógicas de escalado

Las gramáticas definen las relaciones esperadas entre los elementos estructurales y funcionales de la red metabólica asociada con las operaciones del sistema energético bajo análisis. Los elementos estructurales (tangibles) están representados por campos petroleros específicos (el nivel más bajo en el que se realizan las observaciones). La definición de los elementos funcionales, por otro lado, es nocional. No se basa en observaciones directas de entidades tangibles, sino que se determina por la elección del analista de las relaciones que se considerarán en una unidad funcional.

De hecho, es posible definir diferentes elementos funcionales en cualquier nivel jerárquico de análisis dependiendo de la lógica de la agregación de elementos de nivel inferior que, a su vez, dependerá del propósito del estudio. Los elementos funcionales

relevantes se caracterizan por el tipo de petróleo (ligero, medio, pesado) y la edad del campo petrolero (años de operación), así como la ubicación geográfica. En la fig. 3-2 se muestran ejemplos de escalado de las características de los procesadores metabólicos a través de niveles jerárquicos de análisis de acuerdo con los diferentes criterios utilizados para este estudio. A partir del conjunto de datos que caracteriza los procesadores metabólicos de los campos (elementos estructurales) podemos trabajar en los niveles jerárquicos superiores de acuerdo a nuestra necesidad usando varias combinaciones de criterios de calidad del petróleo, edad del campo petrolero, ubicación geográfica y posiblemente otros, dependiendo del propósito del análisis.

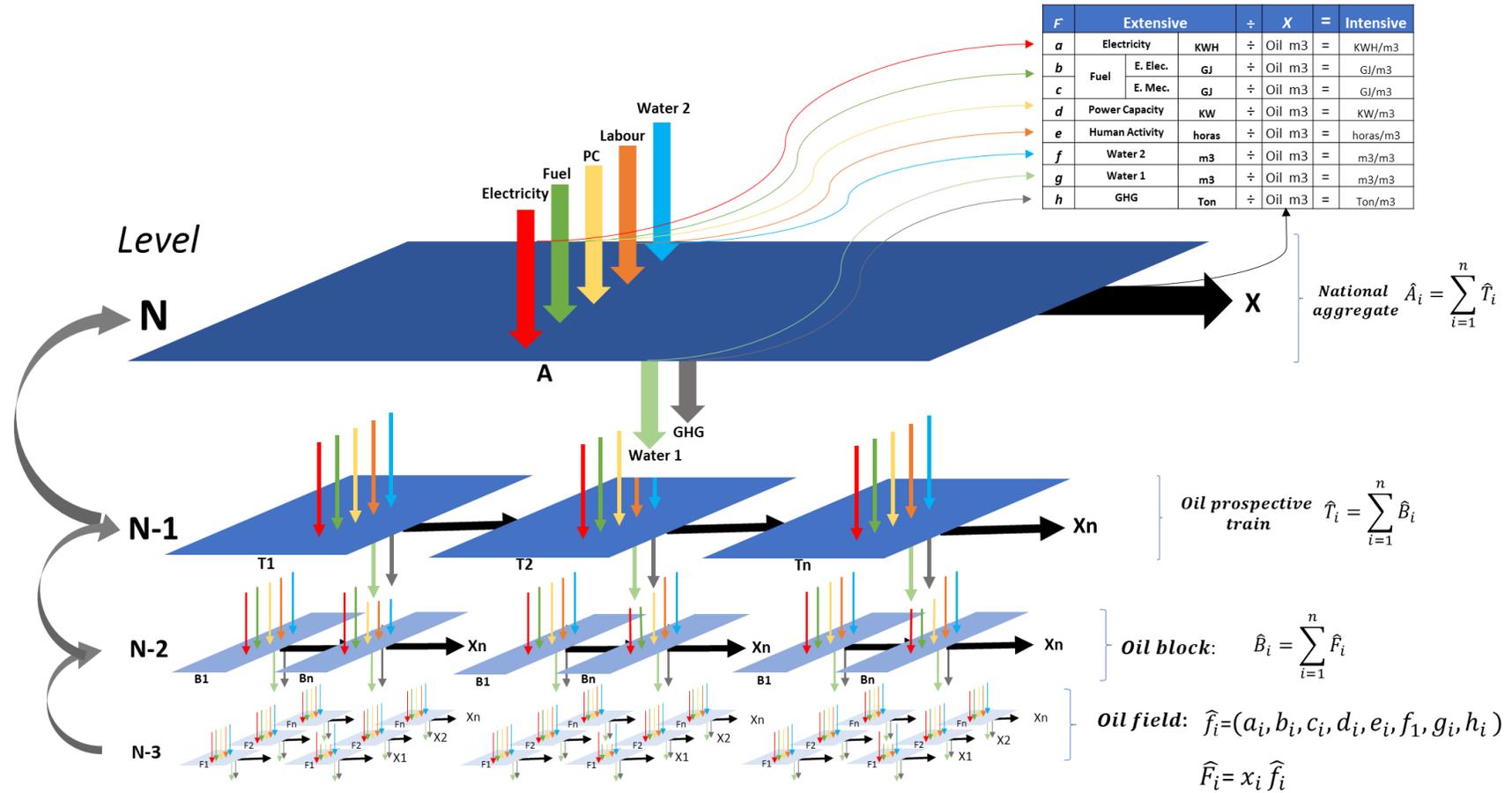
Figura 3-2: Ejemplos de diferentes lógicas de escalado de procesadores en el estudio de caso en Ecuador



Fuente: Parra, Bukkens & Giampietro; 2018

En las representaciones del sistema basadas en datos observados, los flujos de entrada y salida se describen como variables extensivas y reflejan cantidades observables absolutas de flujos. Para cada uno de los elementos estructurales de nivel inferior, se registra la cantidad de portadores de energía, agua dulce, mano de obra, capacidad de energía utilizada, cantidad de petróleo extraído, GEI emitido y aguas residuales producidas. Usando un proceso de agregación simple, esta información se usa para calcular el perfil de entradas y salidas (procesadores metabólicos) de los elementos funcionales de nivel superior.

Figura 3-3: Escalado geográfico del procesador que caracteriza el suministro de petróleo del Ecuador en un momento dado



Las escalas geográficas (campo-F, bloque-B, prospecto -T y agregado nacional) se definen en la sección de fuentes de datos. El procesador metabólico (flujos de entrada y salida) se definieron en la Figura 3-1.

Fuente: Parra, Bukkens & Giampietro; 2018

Las representaciones basadas en datos observados y variables extensivas representan una realización específica (una instancia) de las relaciones esperadas entre los elementos estructurales y funcionales de la red metabólica. Sin embargo, también se puede proceder de manera diferente mediante el uso de variables intensivas y procesadores metabólicos unitarios para crear una tipología de relaciones (benchmarks). Esto se ilustra para el caso de Ecuador en la Fig. 3-3 para un proceso de escalamiento geográfico (desde campos, bloques, prospectos y agregado nacional). Comenzando de abajo hacia arriba (nivel n-3 en la Fig. 3-3), para cada elemento estructural (campo), se calcula un procesador metabólico unitario (el vector fi).

Es decir, las entradas y salidas observadas asociadas con una unidad de suministro de petróleo en el campo dado i , así como su contribución relativa xi (en términos de suministro de petróleo) al elemento funcional nacional en el nivel superior (bloque, nivel n-2 en la Fig. 3-3) (se debe tener en cuenta que $[\sum xi = 1]$). Los procesadores metabólicos unitarios de los bloques en el nivel n-2 se pueden obtener del vector de valores de xi y los procesadores metabólicos unitarios correspondientes de los campos que pertenecen a ese bloque. En esta representación nacional, los procesadores metabólicos de los elementos funcionales y estructurales dependen unos de otros de manera impredecible: es una tipología de relaciones, más que una realización específica (una instancia).

Por lo tanto, dependiendo del propósito de la investigación y/o la disponibilidad de datos, al estudiar la relación entre las características de los elementos estructurales y funcionales a través de los niveles de la organización, se puede construir el conjunto cuantitativo de relaciones mediante:

1. Usar los datos disponibles para calcular el valor del procesador metabólico que se refiere al sistema funcional en su conjunto (la causa eficiente) a partir de la combinación de elementos de nivel inferior que genera ese patrón (la causa formal requerida y la causa material disponible); o
2. Al calcular el perfil esperado de entradas y salidas del elemento funcional a partir de los procesadores metabólicos unitarios que describen los elementos estructurales de nivel inferior (puntos de referencia observados en el conjunto de tipos estructurales,

asociados con las causas formales) y cómo estos elementos estructurales son combinados para expresar la causa eficiente, es decir, el vector $[xi]$.

3. Una combinación de los dos anteriores. En el caso de Ecuador, se ha aplicado una combinación de los dos enfoques.

3.4. Obtención de datos

El sistema de extracción de petróleo en Ecuador está organizado en tres niveles geográficos jerárquicos (ver Fig. 3-3), en línea con la Ley de Hidrocarburos (1978), modificada por última vez el 21 de mayo de 2018 (Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2018), que regula la industria ecuatoriana de petróleo y gas. Los campos ("campos") son las unidades más pequeñas (elementos estructurales) para la exploración y explotación de depósitos de hidrocarburos; Se analizaron 178 campos en total (nivel n-3). Los bloques ("bloques") son áreas de no más de 200 mil hectáreas que contienen varios campos petroleros; Hay 36 bloques en total (nivel n-2). Los prospectos ("tren prospectivos de petróleo") son áreas geográficas con características geológicas similares con potencial de hidrocarburos que cubren varios bloques y campos; Se consideraron 6 prospectos en línea con los estudios del Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables del Ecuador (MERNNR, 2018) y una variante en el prospecto 1, para mostrar los campos de petróleo de la costa ecuatoriana (nivel n-1). El nivel nacional se define como el nivel n. El análisis cubre los 178 campos petroleros de Ecuador activos durante período de 1972 a 2018, cubriendo así el total de la producción petrolera nacional. No se consideró la producción de campos de gas natural.

Los datos actuales e históricos sobre la producción de petróleo, calidad (gravedad API) y el contenido de BSW para los campos petroleros individuales (elementos estructurales, nivel n-3) se obtuvieron de bases de datos, informes e información de campo de varias instituciones públicas (Agencia de Regulación y Control Hidrocarburiífero - ARCH; Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables - MERNNR, anteriormente información proporcionada por el Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos - MICSE) y, agencias y empresas públicas y privadas del sector energético del Ecuador (ARCH, 2020; Petroamazonas EP, 2020; Secretaría de Hidrocarburos, 2018). El suministro de petróleo se refiere al petróleo obtenido del petróleo crudo extraído, después de la separación de hidrocarburos gaseosos y agua producida.

El agua producida se calcula a partir del contenido básico de agua y sedimento (BSW) ("corte de agua") del petróleo crudo extraído, medido a boca del pozo. En Ecuador, el agua producida se refiere básicamente al agua de formación, ya que la recuperación mejorada de petróleo (inundación de agua / inyección de agua) no se practica en una escala significativa. El volumen total de petróleo crudo extraído (el tamaño del sistema) se aproxima como la suma del volumen de suministro de petróleo obtenido y el volumen de agua producida, a partir de valores promedios anuales.

Además, para cada campo de petróleo, se recopilaron datos sobre las entradas y salidas que caracterizan el proceso de extracción (que se muestra en la Fig. 3-1). Los datos sobre electricidad, combustible y capacidad de potencia se obtuvieron de las estadísticas de (ARCH, 2020; ARCONEL, 2018; Petroamazonas EP, 2020; SISDAT, 2019); datos sobre aportes laborales de (INEC, 2019) y consumo de agua dulce de (Parra, Di Felice, Giampietro y Ramos-Martin, 2018). La emisión de GEI de la explotación petrolera se estimó a partir de la quema de gas y el uso in situ de combustible para maquinaria y generación de electricidad (ver Fig.3-1), utilizando datos de (ARCH, 2020; Petroamazonas EP, 2020). Sin embargo, no para todos los campos petroleros se pudo obtener información histórica para todas las entradas y salidas del procesador y, por lo tanto, fue necesario elaborar la información recopilada a nivel de campos petroleros (n-3) mediante el uso de puntos de referencia y triangulación con datos de estadísticas a niveles más altos de observación (ver Fig.3-7).

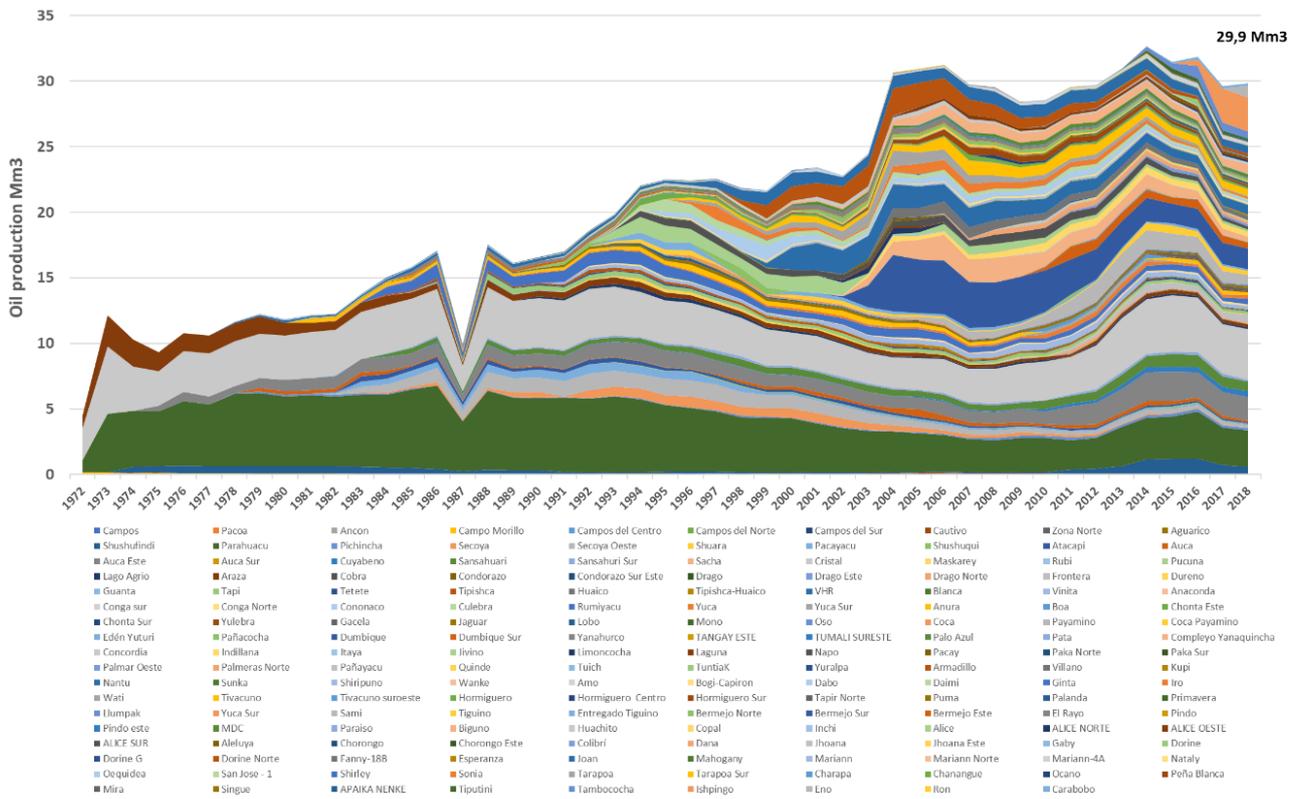
3.5. Resultados y discusión

3.5.1. Descripción general del sistema de extracción de petróleo (1972-2018)

La extracción de petróleo en Ecuador comenzó en 1911 con la operación de los campos en la Región Costa. Sin embargo, el auge petrolero en el país solo comenzó en 1972 con el desarrollo de los campos petroleros en la Amazonía. Desde 1972, la producción de petróleo de Ecuador ha crecido significativamente (Fig. 3-4). En 1987, el Sistema de Oleoductos Trans-ecuatoriano (SOTE), el único oleoducto hasta esa fecha, sufrió una ruptura, como resultado de dos terremotos, que obligó a la producción de petróleo a detenerse temporalmente en varios campos en la Amazonía.

En noviembre de 2003, entró en funcionamiento el Oleoducto de crudo pesado (OCP), que permitió que la producción nacional de petróleo aumentara a 31 millones de m³ en 2006, la mayor producción anual hasta la fecha (ver Fig. 3-4). Entre 2007 y 2016, se produjeron varios cambios en la política de hidrocarburos de Ecuador, se reestructuró el marco institucional, se reformó la ley de hidrocarburos, se modificó la modalidad de los contratos de exploración y explotación del petróleo y se transfirieron varios campos a empresas públicas (Martínez et al., 2016), lo cual influyó en la producción nacional de petróleo que al final de este período, alcanzó un pico máximo anual de 32 millones de m³ de petróleo (Fig. 3-4).

Figura 3-4: Evolución en la explotación de campos petroleros en Ecuador durante el período 1972-2018⁶



Fuente: Parra, Bukkens & Giampietro; 2018

Desde entonces, la producción nacional ha disminuido como resultado de la declinación natural de la productividad de los yacimientos. Este descenso se ha visto compensado temporalmente por la entrada en funcionamiento de nuevos campos a finales de 2016,

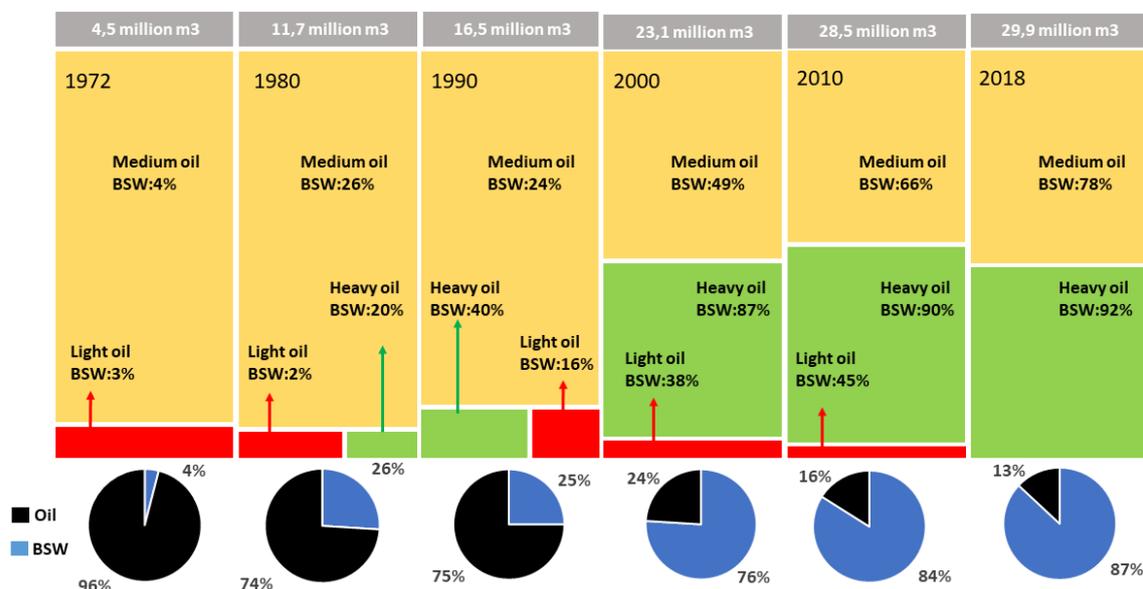
⁶ El volumen de producción de petróleo se refiere al suministro de petróleo obtenido del petróleo crudo extraído, después de la separación del agua producida y los hidrocarburos gaseosos.

como Tiputini y Tambocha. A marzo de 2020, la producción de estos nuevos campos representó aproximadamente el 20% de la producción nacional (ARCH, 2020).

Como se ilustra en la Fig. 3-5, el corte de agua del petróleo crudo extraído (BSW) y la calidad del petróleo producido cambiaron dramáticamente en el tiempo. En 1972, con solo 6 campos activos, la producción nacional de petróleo (total a nivel nacional) se situó en 4,5 millones de m³, de los cuales el 92% fue petróleo medio y 8% petróleo ligero. El contenido promedio de BSW en ese año fue marginal en 4% y el volumen total de petróleo crudo extraído (tamaño del sistema) fue de 4.7 millones de m³. En 2018, se produjeron 29,9 millones de m³ de petróleo, de los cuales el 52% correspondió a petróleo medio y el 48% a petróleo pesado.

El contenido promedio de BSW del petróleo crudo aumentó a aproximadamente 87%, correspondiente a un volumen total de petróleo crudo extraído de 230 millones de m³ y las implicaciones ambientales de este desarrollo son sustanciales.

Figura 3-5: Cambios en las características del petróleo crudo extraído en Ecuador en el período 1972-2018⁷



Fuente: Parra, Bukkens & Giampietro; 2018

⁷ Los gráficos circulares en la parte inferior representan el contenido relativo (% v / v) de petróleo (en color negro) y BSW (en color azul) del volumen total de petróleo crudo extraído. Los gráficos de barras muestran la proporción relativa de petróleo ligero (rojo), medio (amarillo) y pesado (verde) en % v / v. También se muestra el contenido de BSW (% v / v) de las diferentes calidades de aceite. El volumen total del aceite suministrado (después de la separación del agua producida y los hidrocarburos gaseosos) se muestra en gris en la parte superior de los gráficos de barras.

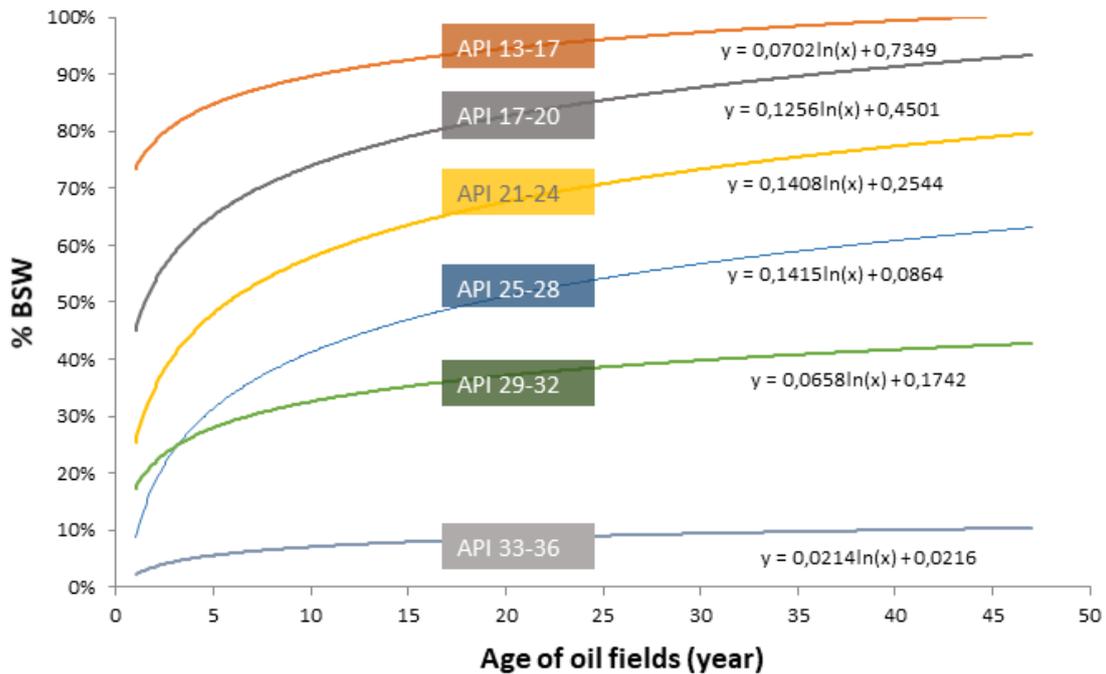
Los datos en la Fig. 3-5 confirman el agotamiento progresivo de las reservas de petróleo de alta calidad en Ecuador y el aumento en la extracción de petróleo de baja calidad (petróleo pesado) y el aumento concomitante en el agua producida y la ampliación del tamaño del sistema (volumen total de petróleo crudo extraído). No obstante, siendo el petróleo la exportación más importante del país, el gobierno ecuatoriano planea aumentar aún más su producción hasta 700.000 barriles ($111 \times 10^3 \text{ m}^3$) por día (equivalente a 40 millones de m^3 por año) para 2021 (EFE, 2017).

3.5.2. Identificación de puntos de referencia Benchmarks

La generación de puntos de referencia a través del cálculo de procesadores unitarios es un aspecto importante del análisis relacional. Los puntos de referencia (representaciones nocionales de procesadores metabólicos unitarios) pueden usarse para llenar vacíos en el conjunto de datos, para caracterizar tipologías de elementos estructurales y funcionales, y para anticipar cambios futuros (análisis de escenarios). En esta sección, ilustramos el uso de puntos de referencia para definir tipologías de campos petroleros y llenar vacíos de datos en los procesadores metabólicos de los elementos estructurales (entradas / salidas). De hecho, no se pudieron obtener conjuntos de datos históricos para todos los campos petroleros en relación con todos los flujos de entrada y salida. No obstante, las series de tiempo completas estaban disponibles para todos los campos petroleros con respecto al suministro de petróleo obtenido, la calidad API y el contenido de BSW del petróleo crudo extraído. Estos datos fueron fundamentales para la generación de puntos de referencia utilizando un enfoque de "sudoku" (Giampietro y Bukkens, 2015).

Como se muestra en la Fig. 3-6, el contenido de BSW del petróleo crudo extraído depende de manera específica de la calidad API y para cada calidad el comportamiento del BSW aumenta constantemente a medida que el campo petrolero envejece. Este gráfico se basa en series de tiempo para todos los campos petroleros en operación durante el período 1972-2018, 178 campos en total, incluidos los agotados (y abandonados) o puestos en producción durante este intervalo de tiempo.

Figura 3-6: Comportamiento del contenido de BSW con el envejecimiento de los campos de petróleo⁸



Fuente: Parra, Bukkens & Giampietro; 2018

Se generaron puntos de referencia a procesadores metabólicos unitarios para tipologías de campos petroleros, clasificados por API, contenido BSW y edad, utilizando los datos disponibles sobre entradas y salidas para campos petroleros individuales, así como estadísticas disponibles. Para este propósito, la clasificación de gravedad API estándar se adaptó y amplió a 6 categorías para obtener puntos de referencia más precisos (ver Fig. 3-6). Como se muestra en la Fig. 3-7, los algoritmos de las curvas BSW vs edad, para cada tipo de campo petrolero por calidad API, permitieron predecir el rendimiento de los campos petroleros con datos faltantes en términos del perfil de entradas y salidas de sus procesadores. Además de llenar los vacíos de datos, estos algoritmos pueden usarse para describir tipologías de campos petroleros y permitir anticipar cambios en el rendimiento futuro de los campos petroleros activos.

⁸ Representación de los 178 campos de petróleo del sistema del Ecuador por categoría API durante el período de 1972 a 2018. Se adaptó la clasificación API estándar a 6 categorías de API para obtener mayor precisión en el análisis.

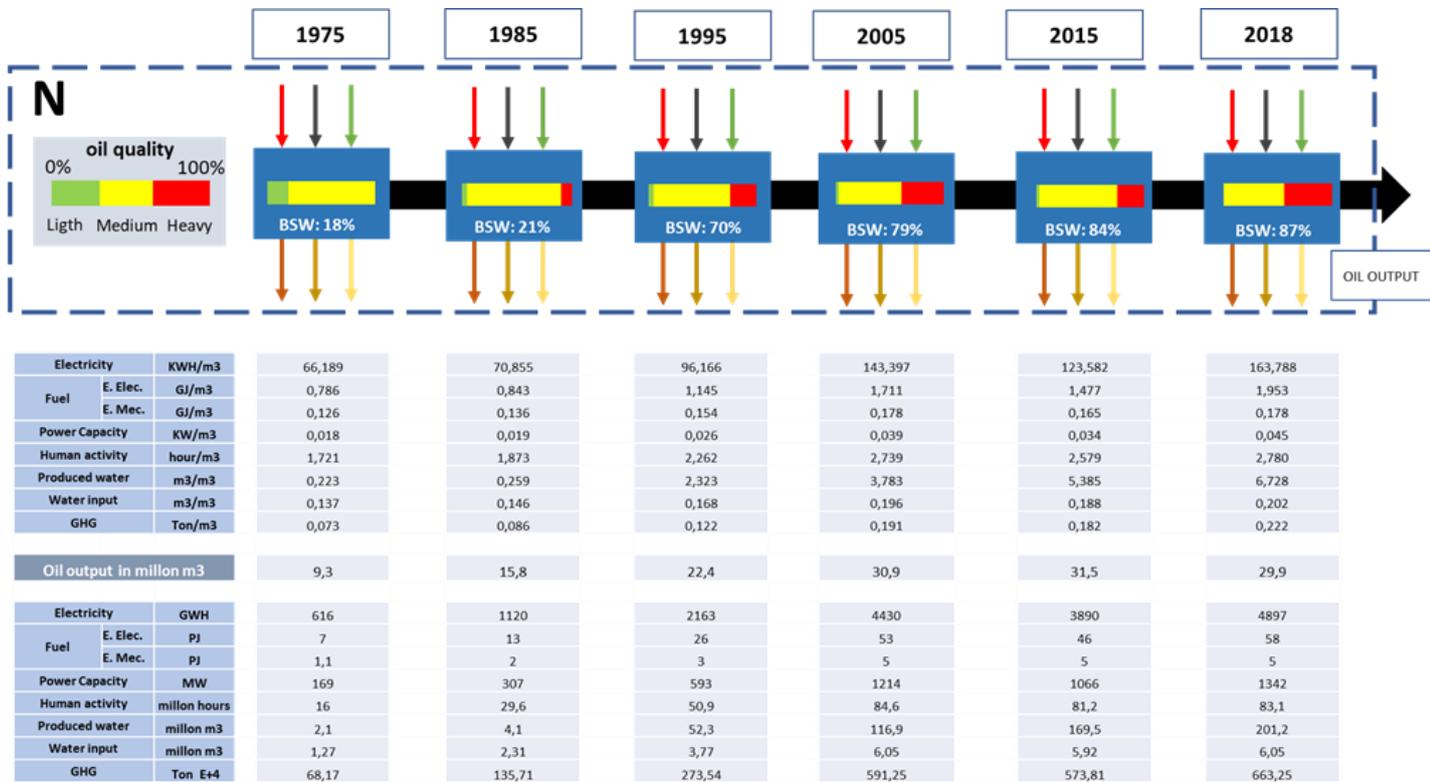
Con los vacíos de datos llenos, se realizaron análisis diacrónicos, sincrónicos y de criterios múltiples, y en las siguientes secciones se ilustran ejemplos de los tipos de resultados obtenidos.

3.5.3. Vista diacrónica a un nivel escogido

Una vista diacrónica del sistema proporciona información sobre el rendimiento del sistema de explotación de petróleo durante un período de tiempo determinado en un nivel de análisis jerárquico específico. Por ejemplo, la Fig. 3-8 muestra que a medida que el sistema envejece, requiere más insumos por unidad de producción de petróleo (nivel nacional) y crea más presión sobre el medio ambiente en términos de emisiones de GEI y agua producida. El análisis también muestra que este fenómeno se crea por la disminución de la calidad del petróleo (API), (mientras transcurre el tiempo, los mejores campos se van agotando y eventualmente son abandonados, mientras que los nuevos campos que entran en producción se evidencian como petróleo de menor calidad) y el aumento en el corte de agua del petróleo crudo (BSW) con el paso del tiempo.

En 1975, apenas se extrajo petróleo pesado y el contenido de BSW promedió fue del 18% a nivel nacional (Fig. 3-8). Por cada metro cúbico de petróleo extraído, el sistema consumió 66 kWh de electricidad (generada en el sitio), 0,126 GJ de combustible (circuito interno más combustible externo para uso como tal), 1,72 horas de trabajo y 0,13 m³ de agua dulce, y generó 0,22 m³ de agua producida y 0,073 toneladas métricas de GEI. En 2018, el 40% del crudo extraído se clasificó como petróleo pesado y el contenido de BSW a nivel nacional fue del 87%. La extracción de 1 m³ de petróleo requirió 164 kWh de electricidad (+ 147%), 0,178 GJ de combustible (+ 41%), 2,7 horas de trabajo (+ 62%), 0,2 m³ de agua dulce (+ 48%) y se generaron 6,7 m³ de agua producida (+ 2911%) y 0,22 toneladas de GEI (+ 203%). En cantidades absolutas (flujos extensivos), la emisión de GEI de la extracción de petróleo aumentó de 682×10^3 toneladas en 1975 a 6632×10^3 toneladas en 2018, y la cantidad de agua producida aumentó de $2,1 \times 10^6$ m³ en 1975 a 201×10^6 m³ en 2018.

Figura 3-8: Vista diacrónica del metabolismo de la extracción de petróleo a nivel nacional que abarca el período 1975-2018⁹



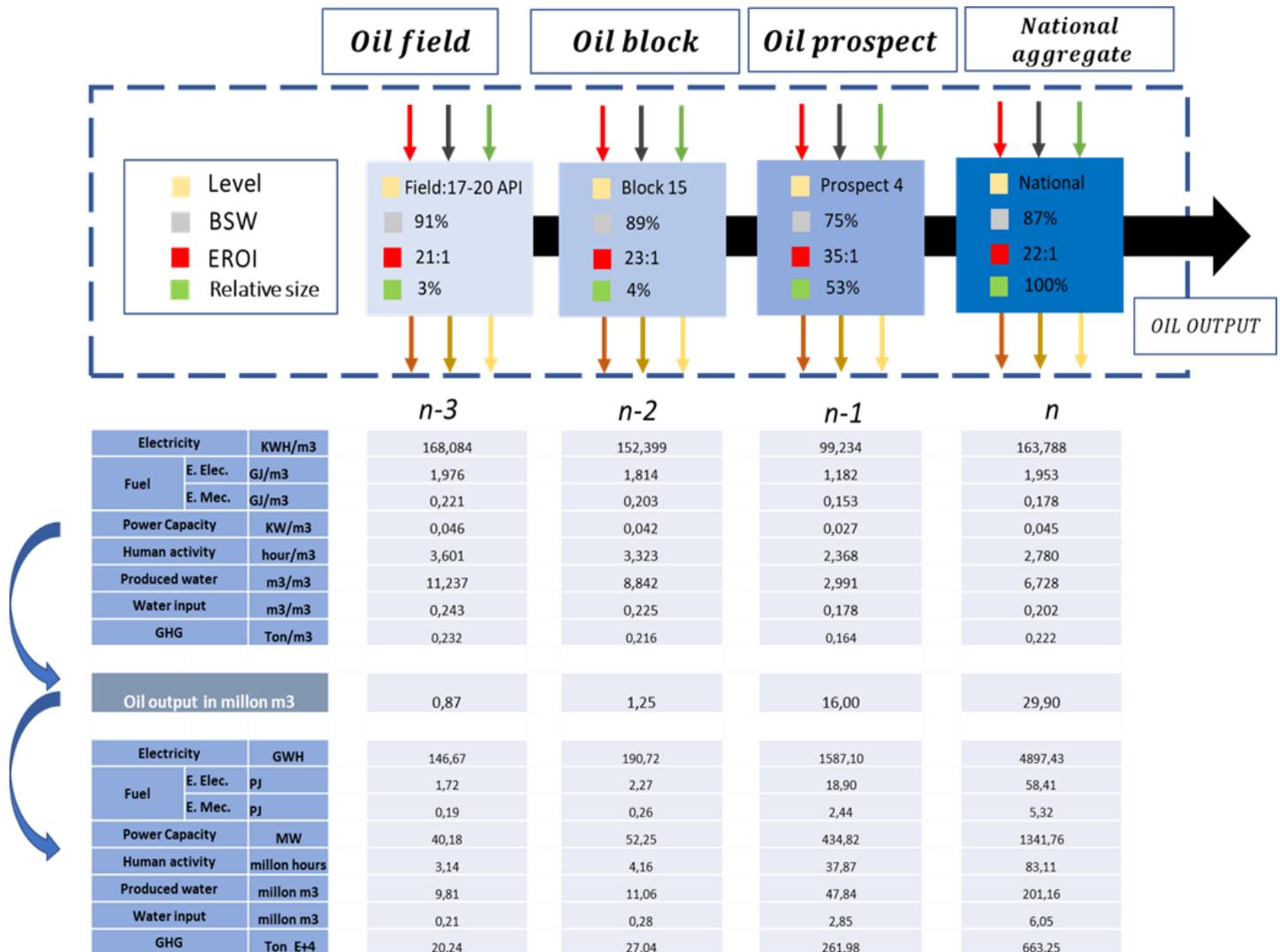
Fuente: Parra, Bukkens & Giampietro; 2018

3.5.4. Vista sincrónica multinivel

En la Fig. 3-9 se presenta una vista sincrónica multinivel que caracteriza el sector de extracción de petróleo del Ecuador en diferentes escalas geográficas de análisis, es decir: campo, bloque, prospecto de petróleo y agregado nacional, en un momento escogido (2018). Este análisis sincrónico muestra algunas representaciones posibles de diferentes puntos de referencia (entrada y salida por unidad de producción de petróleo) en diferentes niveles de análisis, para lo cual se utiliza la configuración de agregación presentada en la gramática de la Fig.3-3 y dependiendo del nivel jerárquico de evaluación, se encuentran diferentes puntos de referencia de entrada / salida.

⁹ La electricidad (primera fila) representa la electricidad generada en el sitio a partir del combustible (segunda fila); el combustible representa el combustible externo e interno (incluidos los hidrocarburos gaseosos producidos) que está destinado a la generación de electricidad in situ (E. Electric) o se utiliza como tal en maquinaria (E. Mechanic).

Figura 3-9: Una vista sincrónica multinivel a través de escalas geográficas de la red metabólica¹⁰



Fuente: Parra, Bukkens & Giampietro; 2018

En este ejemplo en específico, se observa que para campos de petróleo de entre 17 a 20 API (nivel n-3) se requieren 163 kWh por cada m³ de petróleo producido, mientras que en el nivel jerárquico superior (n-2) el bloque requiere 152 kWh de electricidad por m³ de producción de petróleo, el prospecto (nivel n-1) requiere de 99 kWh y el agregado nacional (nivel n) necesita de 164 kWh por cada m³ de petróleo. De igual forma se evidencia diferencias en el uso de mano de obra: se requieren de 3,6 horas por m³ en los

¹⁰ Leyenda: Los datos referidos en esta representación corresponden al sistema de Ecuador al 2018. La electricidad (primera fila) representa la electricidad generada en el sitio a partir del combustible (la electricidad externa es marginal <5% del total de electricidad del sistema de extracción); el combustible representa el combustible externo e interno (incluidos los hidrocarburos gaseosos producidos) que está destinado a la generación de electricidad in situ (E. Electric) o se utiliza como tal en maquinaria (E. Mechanic).

campos, 3,3 horas en el bloque versus 2,4 y 2,8 horas por m³ de producción de petróleo a nivel nacional y prospecto, respectivamente.

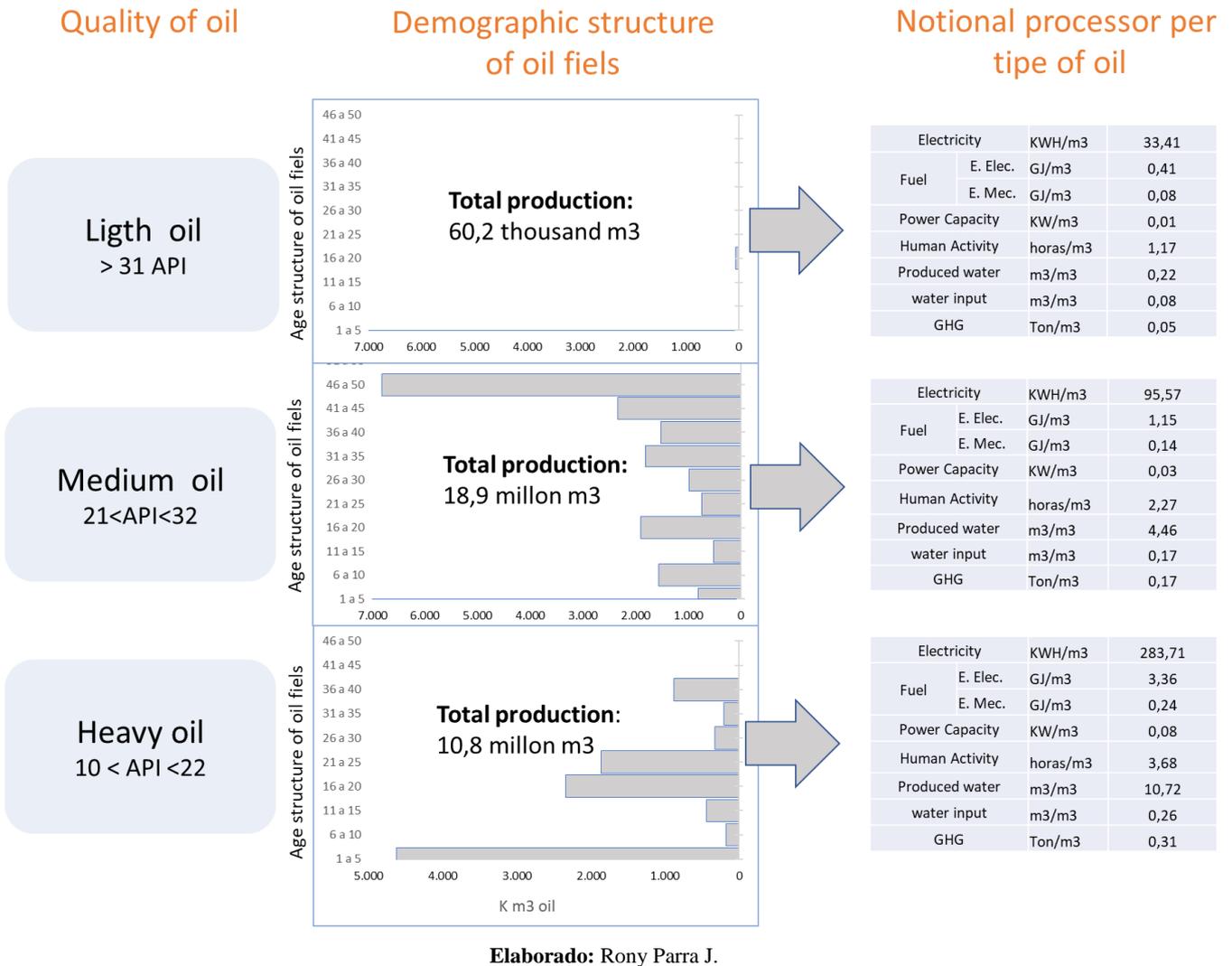
Se observan diferencias marcadas en la cantidad de agua producida: 11,2 m³ de agua por cada m³ de producción de petróleo a nivel de campo, 8,8 m³/ m³ a nivel del bloque, y 3,0 y 6,7 m³ por cada m³ de producción de petróleo en el prospecto y en el agregado nacional, respectivamente. Los niveles de GEI pese a ser heterogéneos no se observa marcadas diferencias.

La Tasa de Retorno Energético (EROI) también se informa en la Fig.3-9. El EROI se calculó de la siguiente manera: energía suministrada (energía térmica del suministro de petróleo) / energía consumida (energía térmica del combustible interno y externo utilizado para la generación de energía en el sitio y usado como tal). Los resultados muestran que el EROI no refleja la variación en las presiones ambientales (por ejemplo, requisitos de agua dulce o eliminación de agua producida en la extracción del petróleo) y es de uso limitado para comprender el conjunto de restricciones biofísicas que afectan el rendimiento de uno o varios niveles del sistema.

La caracterización de la estructura demográfica del sector de extracción de petróleo del Ecuador por tipología de petróleo (clasificación API: ligero, medio, pesado) utilizado en el Fig.3-10, muestra que la producción de petróleo proviene de campos de petróleo medio y pesado y los campos puestos en producción recientemente (de 1 a 5 años) son predominantemente de menor calidad (petróleo pesado).

La estructura de edad de la población de campos petroleros se refleja en las características generales (perfil diferente de entradas y salidas) de los procesadores funcionales (Ejemplo: Calidad del petróleo) definidos en términos nocionales a un nivel jerárquico superior (columna de la derecha en la Fig. 3-10). Como se observa la extracción del petróleo pesado genera más presión sobre el medio ambiente que la del petróleo mediano y ligero.

Figura 3-10: Estructura de edad de los campos petroleros según la calidad del petróleo extraído (API: ligero, mediano y pesado)¹¹



Los diferentes prospectos de petróleo también exhiben diferentes estructuras de edad (Tabla 3-1), lo que tiene implicaciones importantes para su desempeño futuro esperado. La relevancia política de la organización del análisis cuantitativo de esta manera es obvia. La opción de desglosar el análisis no solo en relación con las tipologías de los crudos y la clase de edad, sino también en relación con el área geográfica, permite al analista relacionar los requisitos de suministro ambiental (disponibilidad y calidad del crudo, así como los requisitos de agua dulce) y requisitos de sumidero (capacidad de absorción de agua producida y los contaminantes que contiene, así como las emisiones de GEI) a las

¹¹ Los datos se refieren al 2018. La categoría de edad se refiere a la cantidad de años que el campo petrolero ha estado en producción. Las entradas y salidas mostradas (columna de la derecha) se expresan de forma de procesos unitarios (elementos intensivos).

características locales de los procesos naturales que se espera proporcionen la capacidad de suministro y sumidero.

Esto es particularmente relevante en este estudio de caso ilustrativo, dado que la mayor parte de la extracción de petróleo en Ecuador se lleva a cabo en la cuenca del Amazonas en el noreste del país, hogar de grandes áreas de selva tropical ubicada en las cabeceras de la red del río Amazonas y hogar de varios grupos de indígenas.

Tabla 3-1: Estructura de edad de los campos petroleros por calidad de petróleo extraído (API: ligero, medio y pesado) y ubicación geográfica (prospectos)

Spatial		Estructural			%	Processor - extensive elements							
Oil prospect	Quality (API)	Demographic structure of oil fields				Electricity (GWH)	Fuel		Power Capacity (MW)	Human Activity (millon m3)	Produced water (millon m3)	Water output (millon m3)	GHG (Ton E+4)
		Age (years)	Oil (millon m3)	BSW (%)			Elec. (PJ)	Mec. (PJ)					
1	Light oil	10 a 15	0,06	18%	100%	2,01	0,02	0,01	0,55	0,07	0,01	0,00	0,32
1	<i>Total Light oil</i>		0,06	18%	96%	2,01	0,02	0,01	0,55	0,07	0,01	0,00	0,32
1	Medium oil	26 a 30	0,00	72%	100%	0,14	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,05
1	<i>Total Medium oil</i>		0,00	72%	4%	0,14	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,05
Total prospect 1			0,06	23%	0,2%	2,16	0,03	0,01	0,59	0,07	0,02	0,00	0,36
2	Medium oil	31 a 35	0,10	94,3%	85%	6,60	0,08	0,01	1,81	0,16	1,59	0,01	2,31
2	Medium oil	11 a 15	0,02	2,4%	14%	0,57	0,01	0,00	0,16	0,02	0,00	0,00	0,07
2	Medium oil	5 a 10	0,00	0,0%	0,5%	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
2	<i>Total Medium oil</i>		0,11	93,4%	100%	7,21	0,09	0,01	1,98	0,18	1,59	0,01	2,39
Total prospect 2			0,11	93,4%	0,4%	7,21	0,09	0,01	1,98	0,18	1,59	0,01	2,39
3	Medium oil	46-50	0,22	48%	9%	12,06	0,15	0,02	3,30	0,32	0,21	0,02	3,83
3	Medium oil	26 a 30	0,25	62%	10%	17,50	0,21	0,03	4,80	0,45	0,40	0,03	3,83
3	Medium oil	21 a 25	0,51	74%	20%	61,20	0,76	0,09	16,77	1,41	1,49	0,09	8,62
3	Medium oil	16 a 20	1,18	91%	46%	143,38	1,76	0,19	39,28	3,18	11,93	0,23	25,81
3	Medium oil	1 a 5	0,43	27%	17%	32,02	0,38	0,06	8,77	0,80	0,16	0,06	3,89
3	<i>Total Medium oil</i>		2,59	85%	71%	266,17	3,25	0,38	72,92	6,16	14,19	0,44	45,98
3	Heavy oil	21 a 25	0,06	1%	5%	5,21	0,06	0,01	1,43	0,16	0,00	0,01	0,55
3	Heavy oil	16 a 20	0,72	95%	68%	123,57	1,45	0,16	33,85	2,63	13,23	0,18	16,95
3	Heavy oil	11 a 15	0,28	92%	26%	47,17	0,55	0,06	12,92	1,01	3,13	0,07	6,51
3	<i>Total Heavy oil</i>		1,06	94%	29%	175,95	2,07	0,23	48,21	3,79	16,36	0,26	24,01
Total prospect 3			3,65	89%	12%	442,12	5,32	0,61	121,13	9,95	30,55	0,70	69,98

Spatial		Estructural			%	Processor - extensive elements							
Oil prospect	Quality (API)	Demographic structure of oil fields				Electricity (GWH)	Fuel		Power Capacity (MW)	Human Activity (million m3)	Produced water (million m3)	Water output (million m3)	GHG (Ton E+4)
		Age (years)	Oil (million m3)	BSW (%)			Elec. (PJ)	Mec. (PJ)					
4	Medium oil	46 a 50	6,60	70%	50%	570,57	6,75	0,89	156,32	13,89	15,33	1,12	107,46
4	Medium oil	40 a 45	2,33	67%	18%	200,63	2,37	0,31	54,97	4,89	4,81	0,39	36,20
4	Medium oil	36 a 40	0,75	87%	6%	65,61	0,79	0,10	17,98	1,60	4,96	0,12	13,16
4	Medium oil	31 a 35	0,81	75%	6%	76,31	0,94	0,12	20,91	1,85	2,42	0,13	12,64
4	Medium oil	26 a 30	0,25	78%	2%	29,71	0,37	0,04	8,14	0,68	0,89	0,05	4,45
4	Medium oil	16 a 20	0,72	54%	5%	73,46	0,91	0,12	20,12	1,87	0,83	0,12	9,57
4	Medium oil	11 a 15	0,36	76%	3%	43,59	0,54	0,06	11,94	1,00	1,16	0,07	6,21
4	Medium oil	6 a 10	1,02	55%	8%	83,09	0,99	0,14	22,76	2,14	1,23	0,17	12,87
4	Medium oil	1 a 5	0,37	68%	3%	28,80	0,35	0,04	7,89	0,70	0,79	0,05	7,12
4	<i>Total Medium oil</i>		13,23	71%	83%	1171,76	14,02	1,83	321,03	28,61	32,42	2,22	209,68
4	Heavy oil	36 a 40	0,88	52%	32%	111,68	1,31	0,19	30,60	2,75	0,96	0,19	12,60
4	Heavy oil	31 a 35	0,20	38%	7%	24,50	0,29	0,04	6,71	0,62	0,12	0,04	2,71
4	Heavy oil	26 a 30	0,33	81%	12%	50,30	0,59	0,07	13,78	1,12	1,40	0,08	6,72
4	Heavy oil	21 a 25	0,68	93%	24%	114,31	1,34	0,15	31,32	2,44	8,96	0,17	15,71
4	Heavy oil	11 a 15	0,06	38%	2%	18,43	0,22	0,02	5,05	0,20	0,04	0,01	1,77
4	Heavy oil	6 a 10	0,14	88%	5%	23,48	0,28	0,03	6,43	0,51	1,11	0,03	3,19
4	Heavy oil	1 a 5	0,48	86%	17%	72,63	0,85	0,11	19,90	1,63	2,83	0,11	9,62
4	<i>Total Heavy oil</i>		2,77	85%	17%	415,33	4,89	0,61	113,79	9,26	15,42	0,63	52,32
Total prospect 4			15,99	75%	53%	1587,10	18,90	2,44	434,82	37,87	47,84	2,85	261,99
5	Medium oil	36 a 40	0,77	94%	25%	107,32	1,33	0,13	29,40	2,27	12,05	0,15	17,73
5	Medium oil	31 a 35	0,90	83%	29%	88,57	1,06	0,13	24,27	2,09	4,38	0,16	18,45
5	Medium oil	26 a 30	0,47	82%	15%	48,73	0,59	0,07	13,35	1,14	2,08	0,09	9,32
5	Medium oil	21 a 25	0,23	98%	7%	32,05	0,40	0,04	8,78	0,67	9,09	0,04	5,37
5	Medium oil	16 a 20	0,01	93%	0%	0,85	0,01	0,00	0,23	0,02	0,08	0,00	0,14
5	Medium oil	11 a 15	0,14	97%	5%	19,50	0,24	0,02	5,34	0,41	4,12	0,03	3,25
5	Medium oil	6 a 10	0,53	90%	17%	70,79	0,88	0,09	19,39	1,53	4,65	0,10	11,34
5	Medium oil	1 a 5	0,01	78%	0%	0,79	0,01	0,00	0,22	0,02	0,02	0,00	0,11
5	<i>Total Medium oil</i>		3,04	92%	46%	368,60	4,52	0,48	100,99	8,14	36,47	0,58	65,71
5	Heavy oil	21 a 25	1,13	97%	32%	488,73	5,81	0,29	133,90	4,54	41,16	0,33	50,39
5	Heavy oil	16 a 20	1,62	92%	46%	276,31	3,25	0,36	75,70	5,86	18,41	0,40	37,97
5	Heavy oil	11 a 15	0,10	94%	3%	27,66	0,33	0,02	7,58	0,37	1,58	0,03	3,02
5	Heavy oil	6 a 10	0,03	94%	1%	8,26	0,10	0,01	2,26	0,12	0,53	0,01	0,96
5	Heavy oil	1 a 5	0,61	91%	18%	102,94	1,21	0,14	28,20	2,21	6,26	0,15	14,19
5	<i>Total Heavy oil</i>		3,51	95%	54%	903,89	10,69	0,82	247,64	13,10	67,94	0,91	106,52
Total prospect 5			6,55	94%	22%	1272,49	15,21	1,30	348,63	21,24	104,41	1,48	172,23

Spatial		Estructural			%	Processor - extensive elements							
Oil prospect	Quality (API)	Demographic structure of oil fields				Electricity (GWH)	Fuel		Power Capacity (MW)	Human Activity (million m3)	Produced water (million m3)	Water output (million m3)	GHG (Ton E+4)
		Age (years)	Oil (million m3)	BSW (%)			Elec. (PJ)	Mec. (PJ)					
6	Heavy oil	1 a 5	3,53	83%	100%	1586,36	18,86	0,95	434,62	13,80	16,75	1,00	156,29
6	Total Heavy oil		3,53	83%	100%	1586,36	18,86	0,95	434,62	13,80	16,75	1,00	156,29
Total prospect 6			3,53	83%	12%	1586,36	18,86	0,95	434,62	13,80	16,75	1,00	156,29
National			29,90	87%	100%	4897,43	58,41	5,32	1341,76	83,11	201,16	6,05	663,25

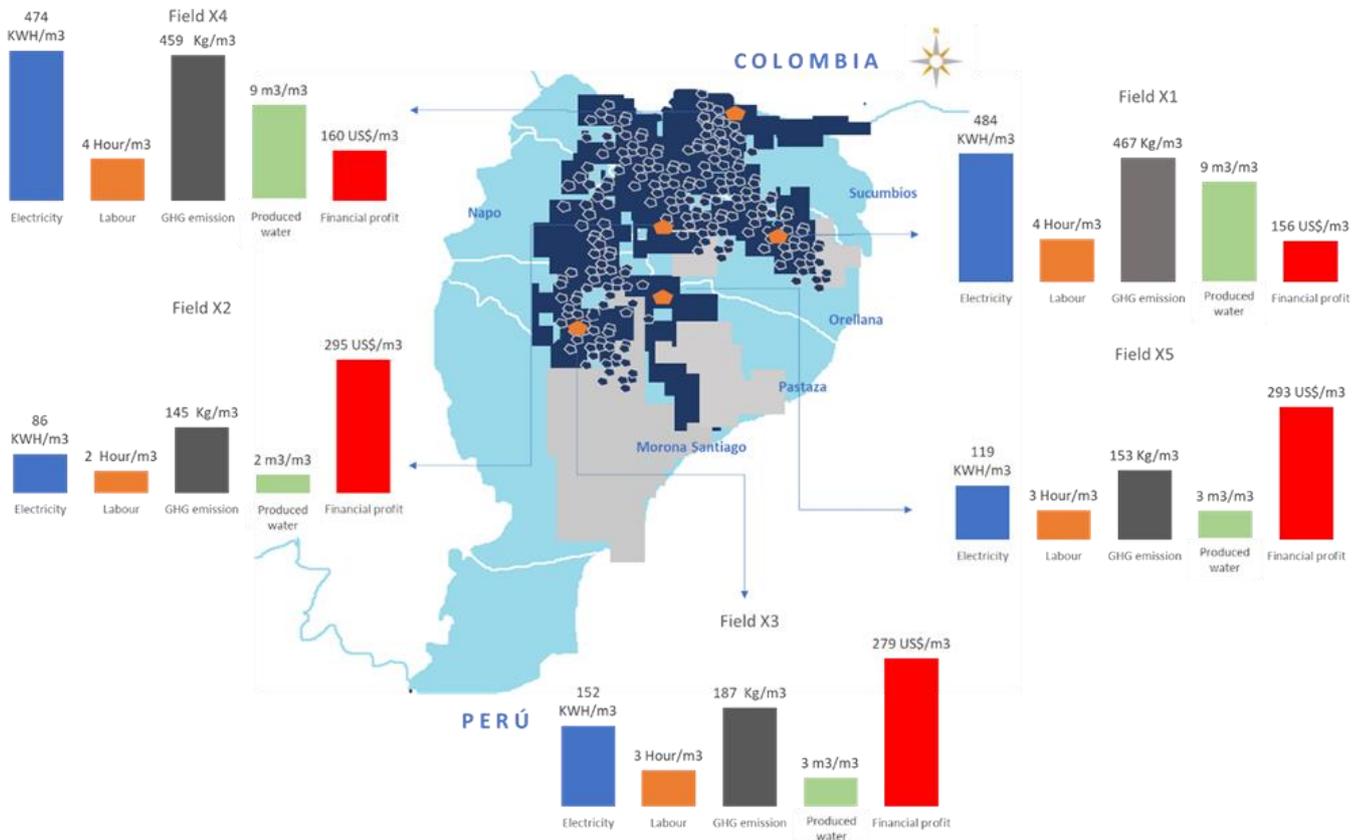
Fuente: Parra, Bukkens & Giampietro; 2018

3.5.5. Análisis multicriterio del rendimiento de los campos de petróleo

El desempeño de los campos, bloques, prospectos de petróleo y todo el sistema de extracción depende de varios factores intrínsecos y extrínsecos. Un método de contabilidad flexible como el análisis relacional puede proporcionar una caracterización holística del desempeño de este complejo sistema al producir un conjunto integrado de criterios relevantes para informar la toma de decisiones. Un ejemplo de caracterización de criterios múltiples se muestra en la Fig. 3-11.y cubre cuatro tipos diferentes de criterios: a) presión ambiental (aquí los indicadores seleccionados son: emisión de GEI y el agua producida eliminada en los sumideros de los depósitos); b) efectos sociales (aquí el indicador seleccionado es: el requisito laboral, que está relacionado con el empleo); c) coeficientes técnicos (aquí el indicador seleccionado es: consumo total de electricidad (externo más interno); d) desempeño económico (aquí el indicador seleccionado es: el beneficio generado en la operación).

En este ejemplo simplificado, las ganancias se estiman de manera aproximada a partir del precio del petróleo (55 USD / barril) frente a los costos asociados con el consumo de energía y la mano de obra. Otros gastos no fueron considerados. El costo laboral se estimó en 6USD / hora; costo de electricidad a 0,25 USD / kWh y costo de combustible a 70 USD / barril de diésel. Obviamente, la elección de los criterios e indicadores debe hacerse en colaboración con los tomadores de decisiones y otros actores sociales afectados por las decisiones.

Figura 3-11: Ejemplo de visualización de criterios múltiples para proceso de explotación petrolera a nivel de campos



Fuente: Parra, Bukkens & Giampietro; 2018

En la Fig. 3-11 se confirma una tendencia bien conocida: los campos que producen petróleo crudo con un corte de agua más bajo (X2, X3 y X5), requieren menor cantidad de electricidad y mano de obra y, por lo tanto, crean menos presión sobre el medio ambiente (en términos de GEI emisión y eliminación de agua) y generan mayores ganancias. De hecho, los resultados muestran que la cantidad de agua producida que se elimina en los embalses es proporcional a los requisitos de electricidad y mano de obra. La cantidad de agua producida, a su vez, depende de la calidad del petróleo, la edad del campo y la ubicación (formación geográfica) (ver Fig. 3-6 y Fig. 3-7). Mientras que los campos X2, X3 y X5, (aquellos con el mayor beneficio económico), producen petróleo con un API de 26, 21 y 17, respectivamente, los otros dos campos mostrados (X1 y X4) producen petróleo de menor calidad (ambos API 15) lo cual se ve reflejado en el beneficio.

3.6. Discusión y conclusiones

En este capítulo se aplicó análisis relacional para caracterizar el desempeño de la extracción de las fuentes de petróleo convencionales en el sistema energético del Ecuador. El estudio muestra que este enfoque puede generar un amplio espacio de información para la caracterización del desempeño de los sistemas energéticos para informar las discusiones sobre la política energética y ambiental. En comparación con los indicadores de uso común como ACB y EROI, el análisis relacional ofrece la ventaja de vincular los diversos elementos del nexo de recursos en una representación basada en procesadores metabólicos sin utilizar métodos de simplificación excesiva que agreguen todas las entradas y salidas en una sola métrica. El uso simultáneo de diferentes métricas para evaluar los flujos de los portadores de energía de diferente calidad y de los flujos de agua que entran y salen del proceso, así como la inclusión de los elementos necesarios del fondo (mano de obra y capacidad de potencia) permiten al analista rastrear características relevantes de proceso en relación con su dimensión socioeconómica y ecológica.

Además, los algoritmos del contenido de BSW versus las curvas de edad, para cada tipo de campo petrolero por calidad API, no solo permiten caracterizar el rendimiento de los campos petroleros a pesar de la falta de datos (en términos del perfil de entradas y salidas de sus procesadores), sino también permite anticipar los cambios esperados en el rendimiento futuro de los campos petroleros. Esta última característica se está desarrollando actualmente. Finalmente, la distinción entre elementos estructurales (tangibles) y funcionales (nocionales) permite la geolocalización del proceso necesario para el análisis del impacto ambiental.

El presente estudio ilustra que, para sistemas metabólicos complejos, el resultado de cualquier proceso de cuantificación está determinado por las elecciones pre analíticas del analista. De hecho, las evaluaciones específicas de las relaciones de entrada / salida, como el EROI o las obtenidas en el Análisis del Ciclo de Vida, siempre serán impugnadas, porque dependen de la elección de las tipologías de elementos estructurales y funcionales considerados en la representación. Dado que esta situación no puede evitarse, es importante desarrollar métodos de contabilidad que sean transparentes en relación con sus supuestos y que puedan desarrollarse en coproducción con los usuarios de los

resultados. Un mapa conceptual, como una gramática, puede ayudar a identificar los diversos factores que deben considerarse en las extrapolaciones.

El análisis relacional de la red metabólica evita la generación de resultados potencialmente engañosos y permite una discusión sobre la relevancia y credibilidad de los supuestos subyacentes al marco del análisis cuantitativo. Contextualiza las diversas evaluaciones técnicas en relación con diferentes preguntas de política: a) el desempeño general del sistema; b) el desempeño específico de las áreas geográficas; c) el desempeño funcional de combinaciones específicas de procesos; y d) el estado del arte de las tecnologías utilizadas para llevar a cabo procesos locales específicos (en referencia a elementos estructurales específicos).

Aunque el estudio de caso presentado aquí no tiene el objetivo explícito de informar la política energética en Ecuador, se pueden sacar algunas conclusiones. El sistema de extracción de petróleo ecuatoriano requiere mucha energía, pero no mano de obra (por ejemplo, en 2018, el requerimiento de electricidad varió entre 32 y 494 kWh / m³ de petróleo, y el requerimiento de mano de obra entre 1 y 4 horas / m³ de petróleo). De hecho, si bien la extracción de petróleo en Ecuador proporcionó empleo a menos del 1% de la población económicamente activa total en Ecuador en 2018 (INEC, 2019), representó el 18% del consumo nacional de electricidad (ARCONEL, 2018). La intensidad energética de la extracción de petróleo y la emisión concomitante de GEI han aumentado constantemente en el tiempo. Sin embargo, para dar un mayor significado a estos puntos de referencia en relación con la transición de energía verde, deben compararse con los que describen el rendimiento de las fuentes de energía alternativas [por ejemplo, ver (Di Felice et al., 2019), para tal ejercicio en Cataluña España].

El presente estudio destaca el nexo energía-agua de la extracción de petróleo convencional. El agua producida es una parte inextricable del proceso de extracción de petróleo. También representa el flujo de residuos más grande asociado con la recuperación de petróleo (en términos de volumen). Durante el período inicial de extracción de petróleo en Ecuador, en ausencia de regulaciones ambientales, las aguas producidas por petróleo se vierten directamente, sin tratamiento previo, al medio ambiente, especialmente en la cuenca del Amazonas (Narváez Quiñonez, 2000), o se almacenan en pozos abiertos, lo que causa daños ambientales y problemas de salud para

la población local (Hurtig y San Sebastián, 2002; Maurice et al., 2019; San Sebastián y Hurtig, 2004).

Sin embargo, desde 2001, con el Decreto 1215, el gobierno ecuatoriano ha prohibido estas prácticas, obligando a las empresas privadas y estatales a depositar las aguas residuales de la producción de petróleo en formaciones subterráneas (pozos de inyección o depósitos). Sin embargo, la medida en que se hacen cumplir estas regulaciones y el riesgo de fuga de las formaciones subterráneas a la capa freática aún no están claros.

En la actualidad, existen tecnologías para el tratamiento del agua producida para su reutilización en el mismo campo de petróleo para recuperar la presión del yacimiento y tener alternativas para mejorar la recuperación de petróleo (recuperación mejorada o reinyección de agua producida) (Katchi et al., 2012; Mijaylova Nacheva et al., 2008). Si bien la reutilización del agua producida para mejorar la recuperación de petróleo puede ayudar a combatir la contaminación ambiental y proporciona beneficios obvios para la conservación del agua (a través del consumo reducido de agua dulce), actualmente en Ecuador la recuperación mejorada o reinyección de agua producida es marginal y la mayor parte de agua producida es devuelta al subsuelo como sumidero ambiental. Se han propuesto otras reutilizaciones del agua producida en áreas con escasez de agua, como riego y uso doméstico, pero los altos costos de tratamiento y transporte limitan su potencial (AlAnezi et al., 2013; Echchelh et al., 2018).

El problema de la eliminación del agua producida no es exclusivo de Ecuador, sino una preocupación creciente también en los principales países productores de petróleo convencionales en la región del Golfo a medida que las reservas de petróleo están envejeciendo y el corte de agua del petróleo crudo está aumentando progresivamente (Al-Hubail y El-Dash, 2006).

Para informar la política, el análisis relacional debe realizarse preferiblemente en coproducción con sus usuarios esperados para deliberar sobre: a) las entradas y salidas relevantes para su inclusión en la definición de los procesadores metabólicos; b) los atributos específicos de la fuente de energía primaria relevantes para el propósito del estudio (por ejemplo, aquellos que afectan el desempeño del proceso de explotación); c) el conjunto de relaciones (gramáticas) relevantes para el proceso de escalado; y d) el

conjunto de indicadores para el análisis multicriterio más adecuado para la presentación del espacio de información a los tomadores de decisiones. Diferentes actores sociales, incluso si se enfrentan con el mismo problema, sin duda optarán por diferentes marcos.

3.7. Referencias

- Al-Hubail, J., El-Dash, K., 2006. Managing disposal of water produced with petroleum in Kuwait. *J. Environ. Manage.* 79, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.05.012>
- AlAnezi, K., Belkharouch, M., Alali, S., Abuhaimed, W., 2013. Produced water characterization in Kuwait and its impact on environment. *Desalin. Water Treat.* 51, 302–306. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.714524>
- ARCH, 2020. Estadísticas de la Agencia de Regulación y Control de Hidrocarburos.
- ARCONEL, 2018. Bases estadísticas del sector eléctrico.
- Cabello, V., Renner, A., Giampietro, M., 2019. Relational analysis of the resource nexus in arid land crop production. *Adv. Water Resour.* 130, 258–269. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.06.014>
- Cadillo-Benalcazar, J.J., Giampietro, M., Bukkens, S.G.F., Strand, R., 2020. Multi-scale integrated evaluation of the sustainability of large-scale use of alternative feeds in salmon aquaculture. *J. Clean. Prod.* 248, 119210. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119210>
- Capellán-Pérez, I., de Castro, C., Miguel González, L.J., 2019. Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strateg. Rev.* 26, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>
- Cleveland, C.J., 2005. Net energy from the extraction of oil and gas in the United States. *Energy* 30, 769–782. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.05.023>
- Cleveland, C.J., Costanza, R., Hall, C.A.S., Kaufmann, R., 1984. Energy and the U.S. economy: A biophysical perspective. *Science* (80-.). 225, 890–897. <https://doi.org/10.1126/science.225.4665.890>
- Cleveland, C.J., O'Connor, P.A., 2011. Energy Return on Investment (EROI) of Oil Shale. *Sustainability* 3, 2307–2322. <https://doi.org/10.3390/su3112307>

- Court, V., Fizaine, F., 2017. Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions. *Ecol. Econ.* 138, 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.03.015>
- Di Felice, L.J., Ripa, M., Giampietro, M., 2019. An alternative to market-oriented energy models: Nexus patterns across hierarchical levels. *Energy Policy* 126, 431–443. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.002>
- Echchelh, A., Hess, T., Sakrabani, R., 2018. Reusing oil and gas produced water for irrigation of food crops in drylands. *Agric. Water Manag.* 206, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.006>
- EFE, 2017. Ecuador aspira a elevar producción de petróleo hasta 700 000 barriles en 2021. *Diario El Comercio*, 19 September 2017.
- European Commission, 2019. The European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2019) 640 final.
- Gagnon, N., Hall, C.A.S., Brinker, L., 2009. A preliminary investigation of energy return on energy investment for global oil and gas production. *Energies* 2, 490–503. <https://doi.org/10.3390/en20300490>
- Gavenas, E., Rosendahl, K.E., Skjerpen, T., 2015. CO₂-emissions from Norwegian oil and gas extraction. *Energy* 90, 1956–1966. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.025>
- Gever, J., Kaufmann, R., Skole, D., Vörösmarty, C., 1991. *Beyond Oil: The Threat to Food and Fuel in the Coming Decades*. University Press of Colorado, Niwot.
- Giampietro, M., 2018. Anticipation in Agriculture, in: Poli, R. (Ed.), *Handbook of Anticipation*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31737-3_23-1
- Giampietro, M., Bukkens, S.G.F., 2015. Analogy between Sudoku and the multi-scale integrated analysis of societal metabolism. *Ecol. Inform.* 26. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2014.07.007>
- Giampietro, M., Mayumi, K., Sorman, A.H., 2013. *Energy analysis for a sustainable future: Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism*. Routledge, London. <https://doi.org/10.4324/9780203107997>
- Giampietro, M., Renner, A., 2020. The Generation of Meaning and Preservation of Identity in Complex Adaptive Systems: The LIPHE4 Criteria, in: *Proceedings of the*

- Tenth International Conference on Complex Systems (ICCS), Hosted Digitally, July 26-31, 2020. Springer.
- Hall, C.A.S., Cleveland, C.J., Berger, M., 1981. Energy return on investment for United States petroleum, coal and uranium, in: Mitsch, W.J. (Ed.), *Energy and Economic Modelling*. Elsevier, Amsterdam, pp. 715–724.
- Hall, C.A.S., Dale, B.E., Pimentel, D., 2011. Seeking to Understand the Reasons for Different Energy Return on Investment (EROI) Estimates for Biofuels. *Sustainability* 3, 2413–2432. <https://doi.org/10.3390/su3122413>
- Heun, M.K., de Wit, M., 2012. Energy return on (energy) invested (EROI), oil prices, and energy transitions. *Energy Policy* 40, 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.008>
- Hurtig, A.K., San Sebastián, M., 2002. Geographical differences in cancer incidence in the Amazon basin of Ecuador in relation to residence near oil fields. *Int. J. Epidemiol.* 31, 1021–1027. <https://doi.org/10.1093/ije/31.5.1021>
- INEC, 2019. Estadísticas laborales, Instituto Nacional de Estadística y Censos [WWW Document]. URL <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/trabajo/> (accessed 11.1.19).
- Katchi, K., Remísio, L., Abdullah, D., 2012. Produced water re-injection, a successful strategy, from pilots to field wide implementation, in: *Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2012, ADIPEC 2012 - Sustainable Energy Growth: People, Responsibility, and Innovation*. pp. 1248–1258. <https://doi.org/10.2118/161307-ms>
- Kittner, N., Gheewala, S.H., Kammen, D.M., 2016. Energy return on investment (EROI) of mini-hydro and solar PV systems designed for a mini-grid. *Renew. Energy* 99, 410–419. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.023>
- Kubiszewski, I., Cleveland, C.J., Endres, P.K., 2010. Meta-analysis of net energy return for wind power systems. *Renew. Energy* 35, 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.012>
- Louie, A.H.-Y., 2017. *Intangible life: functorial connections in relational biology*. Springer New York, New.
- Louie, A.H., 2013. *The reflection of life. Functional entailment and imminence in relational biology*. Springer, New York.
- Louie, A.H., 2009. *More than life itself: a synthetic continuation in relational biology*. Walter de Gruyter.

- Maddox, K.P., 1978. Energy analysis and resource substitution, in: Roberts, F. (Ed.), Symposium Papers: Energy Modelling and Net Energy Analysis, Colorado Springs, August 21-25, 1978. Institute of Gas Technology, Chicago, pp. 133–144.
- Mansure, A.J., Blankenship, D.A., 2010. Energy return on energy investment, an important figure-of-merit for assessing energy alternatives, in: Proceedings of the Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, February 1-3, 2010. p. SGP-TR-188.
- Martínez, J., Parra, R., Reis, M., 2016. Una mirada a largo plazo: Análisis multidimensional de la actividad petrolera en Ecuador. *Cad. PROLAM/USP* 15, 53. <https://doi.org/10.11606/issn.1676-6288.prolam.2016.120127>
- Masnadi, M.S., Brandt, A.R., 2017. Climate impacts of oil extraction increase significantly with oilfield age. *Nat. Clim. Chang.* 7, 551–556. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3347>
- Maurice, L., López, F., Becerra, S., Jamhoury, H., Le Menach, K., Dévier, M.H., Budzinski, H., Prunier, J., Juteau-Martineau, G., Ochoa-Herrera, V., Quiroga, D., Schreck, E., 2019. Drinking water quality in areas impacted by oil activities in Ecuador: Associated health risks and social perception of human exposure. *Sci. Total Environ.* 690, 1203–1217. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.089>
- McIntosh, J.C., Ferguson, G., 2019. Conventional Oil—The Forgotten Part of the Water-Energy Nexus. *Groundwater* 57, 669–677. <https://doi.org/10.1111/gwat.12917>
- MERNNR, 2018. XII Ronda Petrolera Intracampos Ecuador [WWW Document]. URL <http://www.rondaspetrolerasescuador.gob.ec/> (accessed 4.29.20).
- Mijaylova Nacheva, P., Ramírez Camperos, E., Sandoval Yoval, L., 2008. Treatment of petroleum production wastewater for reuse in secondary oil recovery. *Water Sci. Technol.* 57, 875–882. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.202>
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2018. Ley de Hidrocarburos-1978, Decreto Supremo 2967, Registro Oficial no. 583 (10 May 1978), last modified 21 May 2018. Ecuador.
- Mohr, S.H., Wang, J., Ellem, G., Ward, J., Giurco, D., 2015. Projection of world fossil fuels by country. *Fuel* 141, 120–135. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.030>
- Mulder, K., Hagens, N.J., 2008. Energy return on investment: Toward a consistent framework. *Ambio* 37, 74–79. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2008\)37\[74:EROITA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2008)37[74:EROITA]2.0.CO;2)

- Murphy, D.J., Hall, C.A.S., Dale, M., Cleveland, C., 2011. Order from chaos: A preliminary protocol for determining the EROI of fuels. *Sustainability* 3, 1888–1907. <https://doi.org/10.3390/su3101888>
- Narváez Quiñonez, I., 2000. Aguas de formación y derrames de petróleo: la dimensión política en la problemática socioambiental petrolera. PetroEcuador, Quito.
- Petroamazonas EP, 2020. Históricos de producción de petróleo, last accessed May 2020. Ecuador.
- Rashevsky, N., 1954. Topology and life: In search of general mathematical principles in biology and sociology. *Bull. Math. Biophys.* 16, 317–348. <https://doi.org/10.1007/BF02484495>
- Renner, A., Giampietro, M., 2020. Socio-technical discourses of European electricity decarbonization: Contesting narrative credibility and legitimacy with quantitative story-telling. *Energy Res. Soc. Sci.* 59. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101279>
- Renner, A., Giampietro, M., Louie, A.H., 2020. Cyborgization of modern social-economic systems: Accounting for changes in metabolic identity, in: *Proceedings of the Tenth International Conference on Complex Systems (ICCS), Hosted Digitally, July 26-31, 2020*. Springer.
- Rosen, R., 2012. *Anticipatory Systems: Philosophical, Mathematical, and Methodological Foundations*. Springer, New York.
- Rosen, R., 2005. *Life itself: a comprehensive inquiry into the nature, origin, and fabrication of life*. Columbia University Press, New York.
- San Sebastián, M., Hurtig, A.K., 2004. Oil exploitation in the Amazon basin of Ecuador: A public health emergency. *Rev. Panam. Salud Publica/Pan Am. J. Public Heal.* 15, 205–211. <https://doi.org/10.1590/S1020-49892004000300014>
- Secretaría de Hidrocarburos, 2018. *Estadística Hidrocarburífera de Crudo Producción*.
- Serrano-Tovar, T., Peñate Suárez, B., Musicki, A., de la Fuente Bencomo, J.A., Cabello, V., Giampietro, M., 2019. Structuring an integrated water-energy-food nexus assessment of a local wind energy desalination system for irrigation. *Sci. Total Environ.* 689, 945–957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.422>
- Sers, M.R., Victor, P.A., 2018. The Energy-missions Trap. *Ecol. Econ.* 151, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.004>
- SISDAT, 2019. *Reportes de Información Estadística del Sector Eléctrico*, Agencia de Regulación y Control de Electricidad [WWW Document]. URL <http://reportes.regulacionelectrica.gob.ec/> (accessed 11.1.19).

Solé, J., García-Olivares, A., Turiel, A., Ballabrera-Poy, J., 2018. Renewable transitions and the net energy from oil liquids: A scenarios study. *Renew. Energy* 116, 258–271. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.035>

United Nations, 2019. Report of the Secretary-General on the 2019 Climate Action Summit and the Way Forward in 2020.

Capítulo IV

Comprendiendo el metabolismo futuro del sistema energético del Ecuador (ejercicio de construcción de escenarios a partir de los conceptos de la gramática MuSIASEM)

4.1. Resumen

Este capítulo presenta una alternativa metodológica para estudiar el rendimiento futuro de los sistemas de energía del presente, a partir de la construcción de escenarios, entendiendo la dinámica metabólica de escasez de la fuente primaria de energía. Se estudia el agotamiento de las reservas de petróleo a través del uso de tasas de declinación y el cambio de la estructura demográfica de los campos de petróleo para identificar el rendimiento de los patrones metabólicos (metodología desarrollada en los capítulos II y III), además se aproximan los requerimientos energéticos (combustibles y electricidad) de los subsistemas socioeconómicos dado por las tasas metabólicas exsosomalógicas de la matriz de uso final de MuSIASEM e incorpora la comprensión de la presión ambiental en términos de emisión de GEI. Finalmente se integra los hallazgos en un esquema de contabilidad y visualización de flujos de energía a partir del entendimiento de la gramática de energía desarrollada en el capítulo 1.

Este trabajo debe tomarse como una aproximación a la disponibilidad y a la necesidad de energía del sistema socioeconómico del Ecuador al 2035, con lo cual permite discutir en términos de política pública la salud del sistema y observar entradas y salidas de flujos primarios, intermedios y finales de energía y la presión ambiental inherente al sistema.

4.2. Introducción

El rápido e inevitable cambio en la composición de los sistemas de energía en los países, es tema de interés global en varios campos de la ciencia y de los actores que hacen política pública. El constante crecimiento de la demanda en los sectores de consumo, la disponibilidad de infraestructura de transformación y el agotamiento de las fuentes primarias de energía tradicional (International Energy Agency, 2018), sumado a la iniciativa climática para descarbonizar las economías, representan variables críticas en el momento de estructurar políticas energéticas que garanticen el suministro seguro de energía presente y futuro de los países.

Varias instituciones dedicadas a realizar análisis de los comportamientos en los sistemas de energía pronostican diferentes escenarios futuros respecto a la composición del consumo de energía final a escala mundial. La Agencia Internacional de Energía-IEA, The Institute of Energy Economics, Japan-IEEJ, World Energy Council-WEC, BP, Equinor y Greenpeace aunque contemplan escenarios diferentes coinciden que entre el período 2017 al 2035 existirá una disminución de la tasa de crecimiento del petróleo y derivados, mientras que el gas y las energías alternativas tendrán incrementos significativos, pese ello la permanencia del petróleo y combustibles continuará como energético principal al menos en los próximos 15 años (IEA,2019; BP p.l.c., 2019; IEEJ, 2020; WEC, 2019, Equinor, 2019; Greenpeace,2019).

Por ejemplo, la IEA muestra que al 2035, el planeta consumirá cerca 12 mil Mtep de energía final, de los cuales 4,4 mil Mtep será petróleo y derivados (Tasa de Crecimiento -TC 10%), 1,9 mil Mtep será gas natural (TC: 45%), 1,2 mil Mtep será carbón (TC: 1%), 2,5 Mtep será electricidad (TC: 35 %) y 2 mil Tep será energías renovables (TC: 60%) (IEA, 2019).

Pese a tener una mayor participación de energías renovables en las proyecciones energéticas, la generación de gases de efecto invernadero continúan incrementando, pasan de 33 mil MtCO₂ en 2017 a generar 36 mil MtCO₂ en 2035 (IEA, 2019) aunque existen escenarios menos alentadores en donde se presentan cifras cercanas a las 45 mil MtCO₂ para ese mismo año (Greenpeace, 2019).

La electricidad ha tomado fuerza dentro de la planificación de políticas energéticas llegando a representar cerca del 20% del consumo final de energía en 2018 y es cada vez el energético de mayor elección en sectores económicos que se apoyan en industrias ligeras, servicios y tecnologías digitales e incluso se toma como alternativa para el transporte de carga y de pasajeros, pese a no ser siempre lo más adecuado. La electricidad es considerada como un energético eficiente y de alta calidad comparada con otros portadores de energía como el diesel, fuel oil, kerosene, etc. (Giampietro y Sorman, 2012), por lo que la selección inteligente del energético para la realización de las actividades dentro de la economía es primordial para optimizar su rendimiento (Odum, 1996). No todos los países poseen los recursos para la generación eficiente de electricidad como lo es la hidroenergía, por lo que su mix de generación se compone en gran medida de fuentes tradicionales térmicas y nucleares, a más de otras renovables en menor medida.

Latinoamérica y el Caribe-ALC muestran un mix de generación de electricidad con un alto componente de hidroenergía y generación térmica, pero reducida participación de otras energías renovables pese a su privilegiada ubicación geográfica. En el 2018 ALC generó 1,59 millones de GWH de electricidad de los cuales el 47% fue hidroenergía, 44% correspondió a generación térmica, 2% a energía nuclear y 7% a generación de electricidad con fuentes renovables (OLADE, 2019).

Para ALC los pronósticos al 2035 sobre producción de energía primaria, consumo de energía final, generación de electricidad por fuente, emisiones de CO₂, entre otros indicadores, realizados por varias agencias internacionales muestran información con mayor heterogeneidad que las tasas globales. Por ejemplo la IEA, WEC y Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences-ERIRAS pronostican un incremento de la generación de electricidad a 2 millones de GWH, mientras la IEEJ y Greenpeace aproximan el crecimiento a 2,5 millones de GWH y finalmente OLADE propone un escenario de crecimiento a 3 millones de GWH (IEA, 2019; WEC, 2019; ERIRAS, 2019; IEEJ, 2020; Greenpeace, 2019; OLADE, 2019).

Para el caso de estudio, el sistema de energía del Ecuador es analizado en prospectiva únicamente desde el área de electricidad por las organizaciones gubernamentales como el Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables-MERNNR, el cual presentó en el 2016 el “Plan maestro de electrificación 2016-2025”, desarrollando escenarios de

demanda bajo diferentes tasas de crecimiento con la inclusión de proyectos en industrias como: el aluminio, cobre, astilleros y petroquímica. Se pronosticó una demanda anual de electricidad al 2025 que va entre 34,9 a 50,8 mil GWH con tasas anuales de crecimiento desde 4,4 a 9,8 % anual (MERNNR, 2016a).

Existe otro escenario considerando proyectos y actividades en el marco de la eficiencia de la energía, el cual presenta un pronóstico de reducción en el consumo para el período 2016-2035 de alrededor de 543 Mbep y la reducción de las emisiones de GEI de 65 MtCO₂. De acuerdo a las proyecciones estatales, al 2035 se consumirán 80 Mbep de energía en lugar de 235 Mbep con el desarrollo de programas de eficiencia (MERNNR, 2016b).

Un estudio reciente presenta un pronóstico de la matriz de energía del Ecuador al 2030 basados en políticas de eficiencia en el transporte de carga pesada y de pasajeros a partir de la metodología The Long-range Energy Alternative Planning System – LEAP. Se establece que la demanda de energía final del Ecuador al 2030 estará en el orden de 158 Mbep y la generación de electricidad incluyendo nuevos proyectos hidroeléctricos será de 63,5 mil GWH (Castro Verdezoto, Vidoza, & Gallo, 2019).

Existen algunos estudios que, aunque no presentan escenarios futuros, ayudan a comprender la situación del sistema de energía. Fontaine discute sobre la política energética del Ecuador a partir de datos históricos, comparándolo con el desarrollo de indicadores de producción de petróleo y participación de fuentes renovable en la matriz de energía de ALC (Fontaine, Fuentes, & Narváez, 2019), Pinzón analiza por separado el consumo de combustibles dentro de los sectores de consumo final y su afectación en el crecimiento económico (Pinzón, 2018), existen estudios preliminares sobre el potencial de energías alternativas a partir del aprovechamiento del H₂ y la probabilidad de reemplazar el uso final de los combustibles fósiles hacia los sectores del transporte y residencial (Posso, Sánchez, Espinoza, & Siguencia, 2016) y Parra presenta el desarrollo de factores de emisión de CO₂ en la generación de electricidad en el período 2001 a 2014 (Parra Narváez, 2015).

Los estudios revisados muestran que el sistema energético del Ecuador es poco analizado en su integralidad y los resultados obtenidos en varias investigaciones guardan

discrecionalidad y heterogeneidad en la información. Los escenarios construidos desde las Instituciones gubernamentales mantienen diferentes criterios de política lo que dificulta conocer con certeza el horizonte del sector.

En este trabajo se propone estudiar el sistema de energía del Ecuador a partir de entendimiento de los límites biofísicos de escasez del recurso, sumidero ambiental GEI y entendimiento del comportamiento de las tasas metabólicas de energía (se explicará adelante) para lo cual se utilizará la metodología Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism-MuSIASEM y se construirá una contabilidad integral de los flujos de energía para pronosticar la salud del sistema al 2035, finalmente se discutirán los fenómenos encontrados en términos de política pública.

4.3. Metodología

La construcción del escenario del sistema energético del Ecuador se basa en la estructuración de la gramática MuSIASEM presentado en el capítulo 1 (ver Fig.1-1), en donde se muestra los elementos del sistema de energía y su relación con los sectores socioeconómicos. A manera de resumen una gramática consiste en un conjunto de relaciones que enlazan categorías semánticas con categorías formales que previamente han sido definidas para obtener una representación capaz de ser operacionalizada (Giampietro et al., 2012). Es una representación que los actores logran entender sobre la complejidad de realidad de un fenómeno dado, es decir estará adaptada a partir de los dominios de una narrativa en espacio y tiempo.

La gramática de energía permite representar los diferentes sistemas de energía (por ejemplo: producción de combustibles) y vincularlos a variables biofísicas y socioeconómicas de manera integrada. Los sistemas de energía integran subcategorías funcionales (nocionales) y estructurales (tangibles) dentro de una ruta metabólica (por ejemplo: para el sistema producción de combustibles, la ruta metabólica secuencial a seguir estará dado por la extracción de petróleo, transporte, refinación, transporte de combustibles, distribución u uso final del combustible en la sociedad). Esto hace posible unir dos puntos de vista no equivalentes del patrón metabólico de una sociedad dada: a) disponibilidad de recursos (ejemplo: petróleo/gas) y los servicios ambientales (sumidero de desechos sólidos y emisión de GEI) b) la exigencia de factores de producción dado por

las necesidades de los diferentes tipos de calidad de energía (ejemplo: GLP, diesel, gasolinas) necesarios para mantener los sectores socioeconómicos.

Para la generación de la contabilidad de flujos y fondos dentro de la gramática de energía, se requiere tener presente los conceptos de fuente primaria de energía (Primary energy sources -PES), portadores de energía (Energy Carriers -EC), sistemas de energía (Energy system ES) y usos finales de energía (Energy end uses-EU), descritos en el capítulo 1.

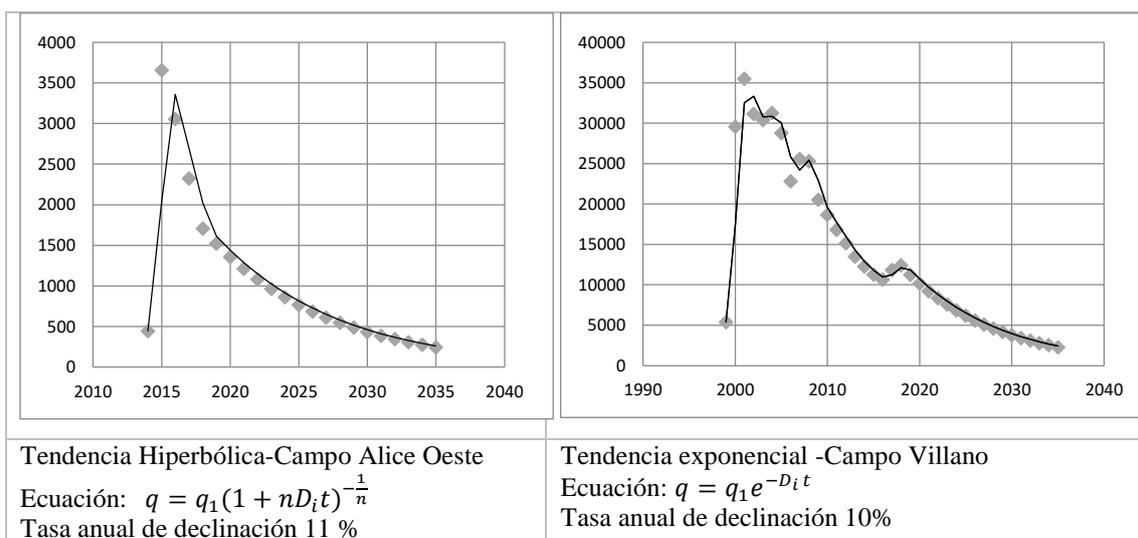
Para la construcción de la gramática de energía al 2035 se siguieron los pasos siguientes:

4.3.1. Agotamiento de la producción de petróleo por tasas de declinación

Estimación de la producción de petróleo en el sistema de extracción a partir del análisis matemático de las tasas de declinación hiperbólica y exponencial que experimentan los campos de petróleo después de que la producción ha alcanzado su pico (Fustier, Gray, Gundersen, & Hilboldt, 2016). Para mostrar la caída de producción de petróleo de cada campo se usó modelos matemáticos simples de tasas de disminución de producción vs tiempo que se ajustan a los valores reales del comportamiento de los campos petroleros (Fustier et al., 2016).

La ecuación más usada es a) ecuación exponencial que está dado por $q = q_1 e^{-D_i t}$ y presenta comportamientos menos favorables en cuanto a la recuperación de petróleo por considerar una tasa de declinación constante que el comportamiento de otras variantes como: b) ecuación hiperbólica dado por $q = q_1 (1 + n D_i t)^{-\frac{1}{n}}$ considerando una tasa de declinación variable, cuando $0 > n < 1$ y c) ecuación armónica dado por $q = q_1 (1 + D_i t)^{-1}$ cuando $n = 1$. Para los tres casos se considera que q es la tasa de producción a determinado tiempo, q_1 es la tasa inicial de producción, D_i es la tasa de declinación del campo, t es el tiempo de producción y n es el exponente de declinación.

Figura 4-1: Declinación exponencial e hiperbólica en campos de petróleo



Elaborado: Rony Parra J.

Del total de campos activos, luego de alcanzar su pico máximo de producción se determinó que el 60 % muestran una tendencia de declinación con características exponenciales, mientras que el 40% presenta características de declinación hiperbólica. Como ejemplo para observar las diferencias entre tendencias se tomaron dos campos con comportamientos diferentes en las tasas de declinación que muestran decrementos entre 10 y 12 % anual (Fig. 4-1).

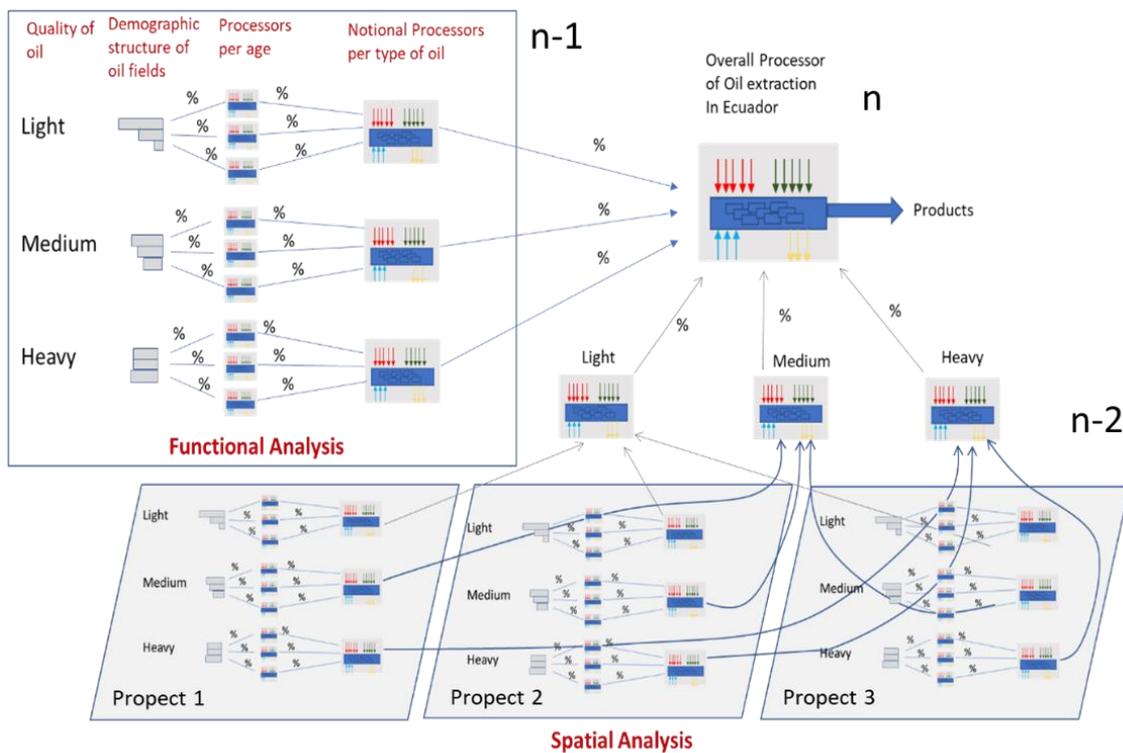
4.3.2. Cambio del rendimiento metabólico de los procesadores

Cambio en el rendimiento esperado de los flujos y fondos en los procesadores. Utilizando los algoritmos para generar puntos de referencia en los procesadores de campos petroleros por calidad API, antigüedad y contenido BSW descrito en la Fig.3-7 se identifica el rendimiento de cada campo activo para el 2035. Este paso es de relevancia toda vez que nos permite alcanzar el nivel de información deseada en el procesador. Conociendo el inicio de actividad del campo, se infiere la edad (por tipología de petróleo liviano, medio y/o pesado) en el momento que se requiere el análisis (2035) y se estima el BSW a partir de los algoritmos (Fig.3-7) correspondientes a la calidad de petróleo y edad del campo, para finalmente determinar los elementos de flujos y fondos en el procesador. Luego, utilizando una taxonomía útil mostrada en la gramática de la Fig. 4-2 podemos representar los cambios de las estructuras demográficas y también los procesadores que describen los

coeficientes técnicos de las unidades espaciales de petróleo en los niveles más bajos (ejemplo: prospectos) e ir escalando hacia los niveles superiores (agregación nacional).

Como se mostró en el capítulo anterior con el análisis diacrónico, el rendimiento del proceso de extracción cambia con el tiempo, mientras los campos de petróleo envejecen. Este patrón de cambio será diferente para las diferentes categorías de petróleo extraído (mostrado a nivel nacional en la parte superior de la Fig. 4-2 y para las diferentes áreas geográficas consideradas (parte inferior de la Fig. 4-2). De hecho, las diferentes áreas geográficas exhiben diferentes estructuras demográficas para la mayoría de las tipologías de campos petroleros, lo que puede implicar diferencias significativas en el rendimiento de extracción de petróleo (dependiendo de la calidad inicial del campo petrolero, la fecha de inicio de operación y el tipo e intensidad del proceso de explotación).

Figura 4-2: Cálculo de procesadores nacionales utilizando la demografía de campos petroleros escenario al 2035¹²



Elaborado: Rony Parra J.

¹² A nivel de la agregación nacional (n) se tiene la definición de procesador que describe el rendimiento del proceso de extracción de una tipología dada a partir de los cambios en la calidad del petróleo en el tiempo. En la parte inferior, se realiza el mismo tipo de análisis dentro de diferentes áreas territoriales de ubicación de los campos de petróleo. Utilizando esta descripción, se encontrarán diferentes estructuras demográficas de campos petroleros para diferentes tipos de petróleo en el escenario al 2035, lo que implica una diferencia significativa en el rendimiento de extracción de petróleo si lo comparamos a los obtenidos en el 2018 (ver Fig. 3-10 y Fig.4-5)

4.3.3. End use matrix

Entendiendo la matriz de uso final (end use matrix) para calcular la demanda futura de energy carrier (combustibles y electricidad) en los subsectores socioeconómicos (Velasco-Fernández, Giampietro, & Bukkens, 2018). Permite identificar el cómo y donde, además del tipo y calidad de energy carrier involucrado en las actividades internas por cada sub compartimiento en sectores socioeconómicos. El escenario deseado se lo realiza a partir de la identificación de las tasas metabólicas de energía (Exosomatic Metabolic Rate- EMR) que relaciona el desempeño de energía y la actividad humana (EMR se mide como la relación de MJ de energy Carrier per hora de trabajo calculado como media anual) en cada compartimiento.

Por ejemplo, los EMR, de acuerdo al nivel de análisis, permiten distinguir la intensidad energética en sub compartimientos de los sectores económicos de un país. Estados que basan su estabilidad económica en procesos de industrialización consumirán mayor cantidad de energía por hora de trabajo, que países en con economías basadas en actividades de servicios o turismo, de igual forma existirá diferencias en términos de intensidad energética por hora de trabajo entre sectores de un mismo sistema de consumo final, por ejemplo el sector primario de extracción de petróleo y el sector camaronero o sectores secundarios como el ensamblaje de autos y el sector de la cerámica.

La demanda de energía futura siempre será un tema de discusión dentro de las políticas de crecimiento económico de los países y con ello la necesidad de buscar la oferta de energía disponible y segura de para mantener la dinámica de las sociedades. Varios países externalizan el costo biofísico de la producción de bienes y servicios y con ello reducen además las emisiones de CO₂ por la quema evitada de combustibles importando los productos que requieren una alta intensidad energética en su producción (Velasco-Fernández et al., 2018), sin embargo, esto implica que en otro lado del planeta se está consumiendo la energía y emanando las toneladas de CO₂ que implica la producción de los bienes y productos que se externalizaron.

La matriz de uso final caracteriza el tamaño del sistema y jerarquiza los usos finales diferenciándolos en subsectores socioeconómicos en donde se metabolizan *flujos de energía* a partir de los *fondos de horas de trabajo* dedicado a la producción de bienes y

servicios incluido las horas invertidas en el mantenimiento de los hogares (households). Como se explicó en el capítulo 1, la contabilidad respeta las especificidades de los energy carrier desde el inicio hasta el final de la vía metabólica de energía, es decir que, en cada compartimiento se metabolizará flujos de electricidad y combustibles con la inversión de trabajo (human activity) necesario para el mantenimiento de las dinámicas económicas.

Para calcular la necesidad de energía (electricidad y combustibles) por sectores al 2035, se utilizó la variable biofísica flujo /fondo que representa la intensidad de energía por hora de trabajo en un uso final determinado y que luego será multiplicado por el elemento de fondo del total de horas de trabajo destinadas al uso final determinado, bajo la siguiente relación:

$$ET = EMR [J/h] \times HA[h]$$

ET: Cantidad de energía, metabolizada en forma de energy carrier para el mantenimiento de un sector económico. Se calcula para cada tipo de energy carrier (electricidad y combustible).

EMR: Energy Metabolic Rate representa la cantidad de energy carrier que se metabolizo por hora de trabajo asignado al uso final.

HA: Es la actividad humana asignada en forma de trabajo para el uso final

4.4. Obtención de Datos

Los datos sobre producción de petróleo fueron estimados a partir del entendimiento sobre el agotamientos de producción de los campos de petróleo, dado por relaciones matemática (declinación hiperbólica y exponencial) que se desarrollaron a partir de series históricas completas, desde el inicio de operación de los 148 campos de petróleo que se encuentran activos a la fecha de este trabajo), para lo cual se utilizó información estadística e información primaria de varias instituciones públicas y privadas, fuentes descritas en el capítulo anterior.

Para la obtención de los requerimientos de energía (electricidad y combustibles) en los procesadores en la extracción de petróleo futuro, fueron estimadas a partir de los algoritmos identificados en del análisis relacional de campos petroleros (tipo de petróleo, edad del campo y BSW) y los inherentes al proceso de extracción (requerimiento de los

portadores de energía, mano de obra, agua dulce, capacidad de generación de energía, emisión de GEI, etc.) desarrollado en el capítulo anterior. Es importante detallar que a partir de este análisis se pudo anticipar no solo los requerimientos energéticos, sino varias entradas y salidas para mostrar los cambios en el rendimiento del sistema de extracción de manera integrada al 2035.

La información sobre la infraestructura en capacidad instalada de los subprocesos en los sistemas de energía (refinación, topping y plantas de generación de electricidad (hidro, termo y otras), fueron obtenidos del balance de energía del 2018, presentado por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables. Para el escenario construido se consideró la capacidad instalada a ese año, puesto que el objetivo de este trabajo es mostrar las brechas posibles entre demanda futura de energía y la capacidad de abastecimiento real a partir de la capacidad instalada.

Para determinar los equilibrios del sistema fue necesario estimar las importaciones y exportaciones en: las fases de extracción de petróleo y en la producción neta de energy carrier. Las exportaciones de petróleo son resultado de la resta de la extracción de petróleo y el uso en la capacidad instalada de refinerías y plantas topping, las importaciones de combustibles es el resultado de la relación de la demanda y producción de combustibles en refinerías (GLP, gasolinas, diesel y fuel oil). Para los flujos de electricidad no se consideró importaciones ni exportaciones puesto que para el caso ecuatoriano estas transacciones son realizadas en casos emergentes.

Para la estimación de demanda de energía en los usos finales de la sociedad por compartimiento económico fue necesario calcular los a) EMR por compartimiento económico y b) las horas de actividad humana para mantener la dinámica económica en los compartimentos.

La elección de los EMR fue escogida por el investigador a partir de benchmarks de las intensidades de energía en los sectores económicos en otros países latinoamericanos y europeos realizados en trabajos anteriores por el equipo de investigación en el ICTA y con el análisis de los informes de política energética del Ecuador (MERNNR, 2019). Este paso es determinante en la construcción de los escenarios deseables ya que, en esta aplicación, es el investigador quien decide cómo y en donde crecerá la demanda en el

sistema. Para que este trabajo sea utilizado para la toma de decisiones a futuro, los EMR deben ser trabajados con los actores de la política pública decidiendo en que sectores de la economía se propicia el crecimiento futuro como país.

La elección de las horas de actividad humana fue estimado utilizando la proyección demográfica realizada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos-INEC, cuya aproximación refleja una población nacional al 2035 de 21.150.000 habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2018). Primero: se transformó el total de habitantes a horas posibles en un año, igual a 185,2 G horas/año (21.15 millones de personas x 8,760 horas/año). Segundo: se determinó el elemento de fondo por subsector socioeconómico, para lo cual se identificó la Población Económicamente Activa PEA que llegará al 48% de la población total con 10.260.000 habitantes.

De la PEA se tomó únicamente la *población con empleo* (empleo pleno: ~2.000 horas/año por trabajador y empleo no pleno: se estimó por los diferentes subsectores económicos en el rango de 640~2.000 horas/año por trabajador) y se identificó las horas invertidas en una año por subsectores de la economía (se utilizó la distribución de trabajadores resultado de la composición histórica en el período 2007-2018), que representan los 9.750.00 de trabajadores y luego calculó las horas de trabajo efectivo dedicadas a mantener la economía del país, reflejando un total agregado de 14,2 Ghoras/año (= 9.75 millones de trabajadores x 1,500 horas/año).

Finalmente, la diferencia entre el tamaño del sistema y el agregado en los subsectores económicos derivan a la actividad humana destinada a mantener los households cuyo valor es de 170,9 Gh/año.

4.5. Resultados y discusión

4.5.1. Descripción de la situación energética del Ecuador al 2017

La producción de combustibles de las refinerías no es suficiente para abastecer la demanda interna. Ecuador produce 306 PJ de combustibles, sin embargo, su consumo total es de 445 PJ. Se produce el 25% del consumo en GLP, 49% del consumo en Diesel,

44% del consumo en gasolina y el 343% del consumo de Fuel Oil que es un energy carrier de baja calidad.

Tabla 4-1: Portadores de energía netos (combustibles)

FUEL		Production PJ	Import PJ	Export PJ	Total PJ
R1-R2-R3- Topping	LPG	13	38	N/A	51
	DIESEL	98	104	N/A	202
	GASOLINE	68	87	N/A	155
	FUEL OIL	127	28	118	37
Total 1		306	257	118	445
Other	Oil	25	N/A	N/A	25
	NG	26	N/A	N/A	26
Total		357	257	118	496

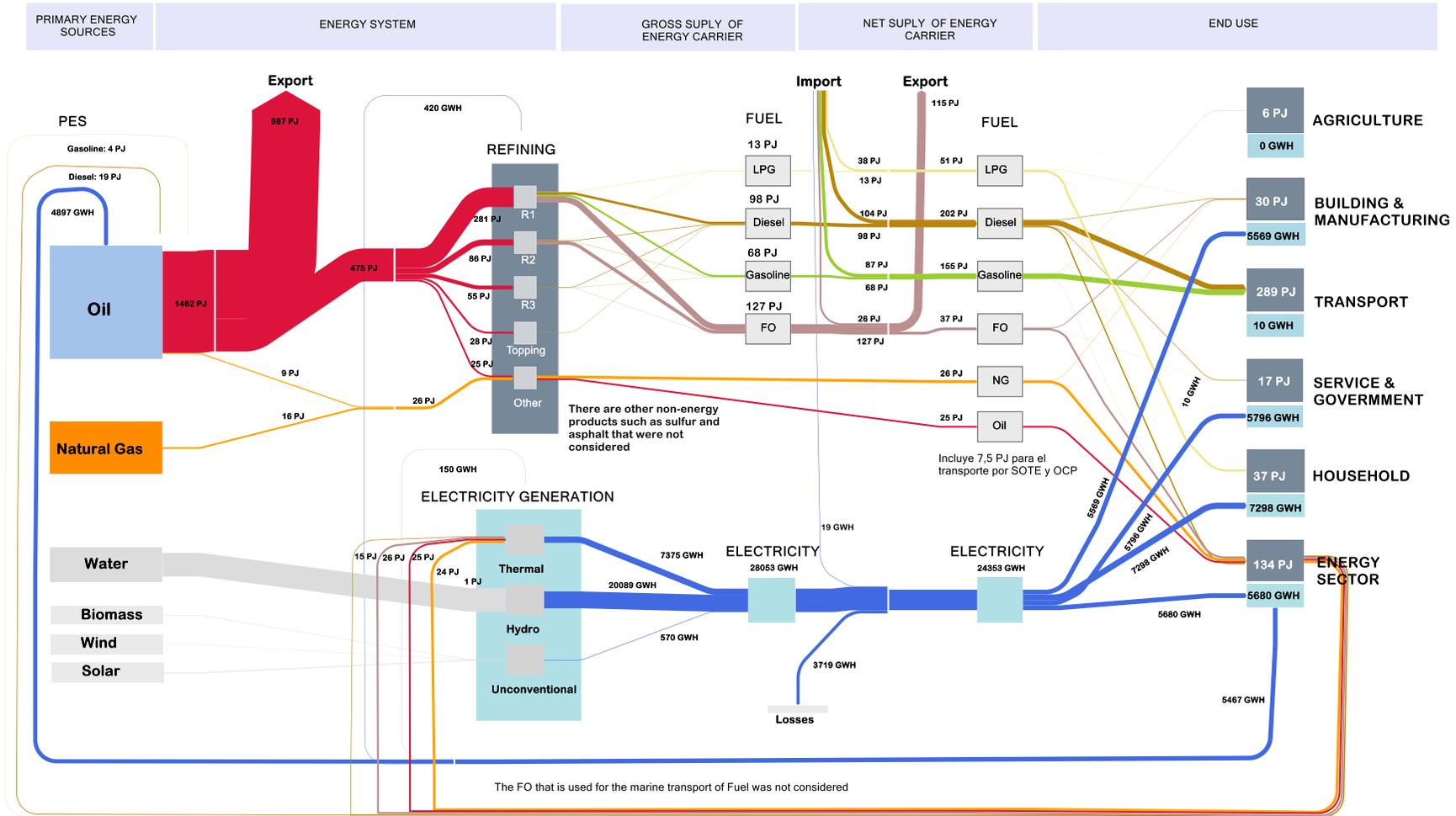
Elaborado: Rony Parra J.

Fuente: Información del Balance de Energía, 2018; Estadísticas de ARCH, CELEC y MERNNR

El Mix de generación eléctrica por su parte produce 28.053 GWH de electricidad bruta de los cuales el 72 % fue generación hidroeléctrica, el 26 % térmica a partir de la quema de diferentes combustibles (NG, LPG, Diesel, FO and Oil) y únicamente el 2% con energías renovables (biomasa, solar y viento). El sistema importó 19 GWH de Colombia y tuvo pérdidas en el sistema de distribución de 3700 GWH que representó el 12 % de la energía producida, lo que conlleva a tener energía disponible por 24.353 GWH dispuestos para los diferentes sectores de consumo final.

Los sectores que llaman la atención por su consumo de energía es el sector transporte que concentra el 56% de combustibles y nulo consumo de electricidad, aunque este panorama puede cambiar a finales de 2020 por la entrada en operación de dos proyectos de transporte eléctricos para pasajeros y carga como es el Tranvía en Cuenca y el Metro en Quito (El Comercio, 2020). El sector de service & government consume cantidades de energía similares al del sector de Building y Manufacturing con la cuarta parte del consumo de electricidad y entre el 3% al 6% de combustibles.

Figura 4-3 : Energy gramar “Sistema de Energía del Ecuador 2017”



Elaborado: Por el Autor en base a la gramática establecida en (Parra, Di Felice, Giampietro, & Ramos-Martin, 2018)

Fuente: Información del Balance de Energía, 2018; Estadísticas de ARCH, CELEC y MERNNR

El sector energía pese a ser el sector que genera la energía para la economía, es el sector que concentra el 26 % y 23% de combustibles y electricidad, respectivamente. Por ejemplo, el proceso de extracción de petróleo consume 4.897 GWH para producir 1.482 PJ de petróleo y la generación térmica de electricidad consume 93PJ de combustibles para producir 7.375 GWH. Los hogares tienen el 30 % de electricidad y el 7 % de combustibles, mientras que la agricultura presenta consumos marginales por debajo del 1% en combustibles y electricidad.

4.5.2. Construcción de escenario de energía (2035)

El escenario está construido a partir de: a) entendimiento del agotamiento de petróleo como el principal primary energy sources del sistema energético del Ecuador para lo cual se realiza una proyección de la producción de petróleo a partir del análisis matemático de las tasas de declinación hiperbólica y exponencial que experimentan los campos de petróleo después de que la producción ha alcanzado su pico (Fustier, Gray, Gundersen, & Hilboldt, 2016). Luego se analiza el cambio de la estructura demográfica de los campos de petróleo y el rendimiento de los patrones metabólicos como la energía y la actividad humana invertida en el proceso de extracción con el paso del tiempo, además se identifica el cambio de la calidad del energy carrier con el envejecimiento de los campos de petróleo detallado en el capítulo III; b) análisis de la necesidad futura de combustibles y electricidad para los sectores socioeconómicos basado en la matriz de uso final de energía (Velasco-Fernández, Giampietro, & Bukkens, 2018), esto permite identificar el tipo de energy carrier para cada tipología de uso final y la proyección se lo realiza a partir de los exosomatic metabolic rate que relaciona el desempeño de energía y la actividad humana en cada compartimiento (ver marco metodológico).

4.5.3.1. Reducción de producción de petróleo (2035)

Los campos de petróleo experimentan una caída natural de su producción luego de llegar a su pico máximo de producción en donde las empresas intentan mantenerlo el mayor tiempo posible puesto que eso incrementa su rentabilidad, sin embargo y pese a la apuesta por la eficiencia en las operaciones, el límite biofísico de escasez del recurso es inevitable.

La extracción de petróleo en el Ecuador mostró un crecimiento sostenido en el período 2010-2016, alcanzando a finales del período el pico máximo de producción anual de 32 millones de m³ de petróleo. Desde entonces la producción nacional experimenta decrementos significativos resultado de la declinación natural de los reservorios que en su mayoría han alcanzado su pico máximo de producción y que ahora presentan comportamientos definidos teóricamente por las tasas de declinación anual (60% de los campos presentan una tendencia de declinación exponencial y el 40% hiperbólica).

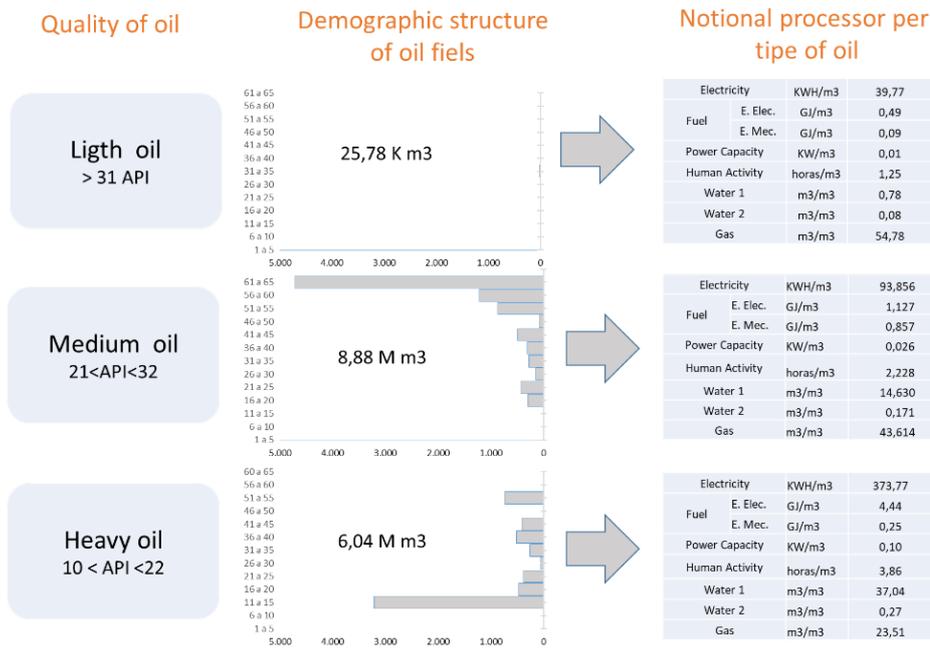
En el escenario construido al 2035, el Ecuador reducirá su producción a 14,9 Mm³ de petróleo, 47% por debajo de los niveles en 2016, año en el que se consiguió la mayor producción histórica. Este horizonte no considera la posible incorporación de nuevos descubrimientos y la inclusión de recursos contingentes 3C que de acuerdo a cifras del Estado fue de 222,9 Mm³ en el 2017 (Hidrocarburos, 2017).

4.5.3.2. **Rendimiento del sistema de extracción (2035)**

La determinación de la proyección de la producción de petróleo no es suficiente para entender el sistema de extracción de petróleo en su integralidad, es necesario también conocer los componentes intrínsecos del sistema. Es indispensable responder preguntas como: ¿Qué calidad de primary energy sources se extraerá en el futuro?, ¿Cuántas horas de actividad humana se requerirá para extraer las reservas de petróleo?, ¿Que insumos de energía se necesitará para su extracción?, ¿Cuál será el impacto ambiental?, entre otras que serán contestadas construyendo la contabilidad biofísica para el escenario escogido a partir del comportamiento demográfico de los campos de petróleo y caracterizando los procesadores estructurales en el sistema de extracción, metodología desarrollada en el capítulo anterior.

Como podemos observar el resultado del análisis funcional de tipologías de campos por la calidad del petróleo a una subescala nacional n-1 (ver Fig. 4-5), muestra las variantes demográficas de su composición, para petróleo pesado la mayor concentración de producción se sesga a campos entre 11 a 15 años de edad, mientras que para petróleo de calidad media la concentración de la producción de petróleos vienen de los campos de mayor edad entre 60 y 65 años, y como se esperaba la participación de la producción de petróleo liviano prácticamente desaparece del sistema.

Figura 4-5: Cambio de rendimiento en la extracción de petróleo a escala nacional proyectada al 2035



Elaborado: Rony Parra J.

En cuanto al rendimiento, la extracción de petróleo medio tiene mejor rendimiento en comparación al petróleo pesado. Por ejemplo: el sistema de extracción de petróleo medio requerirá 93,8 KWH de electricidad, 1,97 GJ de fuel, 0,17 m3 de agua de ríos y 2,2 horas de trabajo por cada m3 de petróleo extraído, mientras que el sistema de petróleo pesado encarece los consumos de flujos y fondos a 373,7 KWh de electricidad, 4,69 de fuel, 0,27 de agua de ríos y 3,8 horas de trabajo por cada m3 de producción de petróleo.

Partiendo de los elementos intensivos hacia los elementos extensivos del procesador del sistema agregado nacional (nivel-n) se pueden inferir los consumos de varios flujos y fondos como se mostró en el desarrollo de los anteriores capítulos de esta tesis, sin embargo, solo haremos uso de los flujos energéticos para completar la información en el escenario de energía nacional. Al 2035 el sistema de extracción de petróleo consume 3.096 GWH de electricidad y 46 PJ de fuel para la extracción de 14,9 Mm3 de petróleo.

Figura 4-6: Cálculo de energy carrier (electricidad y combustibles) en el procesador nacional al 2035

Metabolic elements		Intensive	Oil	Extensive		
Electricity	KWH/m3	206,92	14964476 m3	GWH	3096,47	
Fuel	E. Elec.	GJ/m3		2,46	GJ	36.873.683
	E. Mec.	GJ/m3		0,61	GJ	9.148.390
Power Capacity	KW/m3	0,06		MW	848,34	
Human Activity	horas/m3	2,89		Hours	43.192.613	
Water 1	m3/m3	23,67		m3	354.133.610	
Water 2	m3/m3	0,21		m3	3.186.252	
Gas	m3/m3	35,51	m3	531.323.584		

Elaborado: Rony Parra J.

4.5.3.3. Demanda de energía (2035)

A partir del benchmark realizado y el análisis de las políticas energéticas se estableció que en el subsector agricultura existe un crecimiento de la tasa metabólica de combustibles en comparación con el año base: pasa de 2,6 a 4 MJ/h, y de 0 a 0,5 MJ/h en electricidad, esto significa que existe una tecnificación leve de los procesos agrícolas en base a las políticas agrarias. En el Building and Manufacturing pasa de 7,4 y 11,3 MJ/h a 15 y 30 MJ/h de electricidad y fuel respectivamente, esto significa que crece la intensidad bajo la inclusión de proyectos como la siderurgia, papel y petroquímica.

En el transporte existe un cambio con la inclusión de proyectos de transporte de pasajeros y de carga accionados con electricidad, los valores cambian de 0 a 2 MJ/h en electricidad y de 309 a 300 MJ/h en fuel dado por la mejora tecnológica en el parque automotor. En el subsector de Servicios y Gobierno pasa de 4,6 a 5 MJ/h en electricidad y de 4 a 6 MJ/h, en los Households se mantienen sin mayores cambios de 0,2 a 0,3 MJ/h en electricidad y de 0,3 a 0,5 MJ/h en combustibles, finalmente uno de los sectores donde se concentra el mayor consumo por hora de trabajo es el sector de energía en cuyo caso la intensidad energética se incrementa de 114,7 a 115 MJ/h y de 750,4 a 810 MJ/h principalmente por el impacto del envejecimiento del sistema de extracción, que pese a disminuir la tasa de

producción de petróleo los requerimientos de energía son mayores por la demografía de los campos explicados arriba.

En la Fig. 4-7 se muestra los nuevos requerimientos de energy carrier del sistema agregado de 151,1 PJ que equivale a 41.962 GWH de electricidad mostrando un crecimiento del 70% y de 758,1 PJ de combustibles con un incremento del 50% respecto a los valores mostrados en el 2017. Los sectores que lideran el consumo de combustible son el sector transporte con 418,4PJ y sector energético con 105,3 PJ que representan el 55% y 14% respectivamente sobre el total de consumo de fuel, mientras que en el mayor consumo de electricidad se concentra en los sectores de households con 51,3 PJ y sector Building and Manufacturing con 49,7 PJ que representan el 34 % y 33% respectivamente sobre el total de electricidad.

Figura 4-7: Requerimientos de electricidad y fuel por composición socioeconómica al 2035

Ecuador 2035	10 ⁹ hours/year	Electricity	Fuel	PJ/año		
	0	EMR Elec	EMR Fuel	Energy consumption		
Average Society	185,2	MJ/hour	MJ/hour	Electricity	Fuel	
	x	0,8	4,1	=	151,1	758,1
Agriculture	3,2	0,50	4,0		1,6	12,7
Building and Manufacturing	3,3	15,0	30,0		49,7	99,3
Transport	1,4	2,0	300,0		2,8	418,4
Service and government	6,2	5,0	6,0		30,8	36,9
Household	171,0	0,3	0,5		51,3	85,5
Energy Sector	0,13	115,0	810,0		15,0	105,3

Elaborado: Rony Parra J.

4.5.3. Gramática MuSIASEM 2035

Luego de estudiar el sistema por separado resulta imprescindible integrar los hallazgos en una gramática MuSIASEM 2035, para visualizar los cambios y discutir sobre la salud del sistema incluyendo los límites biofísicos de escasez del recurso y las restricciones laterales de sumidero (indicador escogido: GEI), acorde a la capacidad del Estado para garantizar la seguridad en el abastecimiento de energía interiorizando o exteriorizando los flujos de entrada al sistema.

El sistema de energía 2035 muestra cambios en su configuración y en la dimensión de los flujos energéticos que entran y salen de los compartimientos para generar el equilibrio al sistema. El petróleo como PES, muestra reducción de su tamaño de 1.482 PJ de oil del 2017 a 761 PJ de oil en 2035, además del cambio en la composición intrínseca del sistema hacia la producción de campos de petróleo pesado y de menor calidad que impactará en las entregas a las refinerías y en las exportaciones.

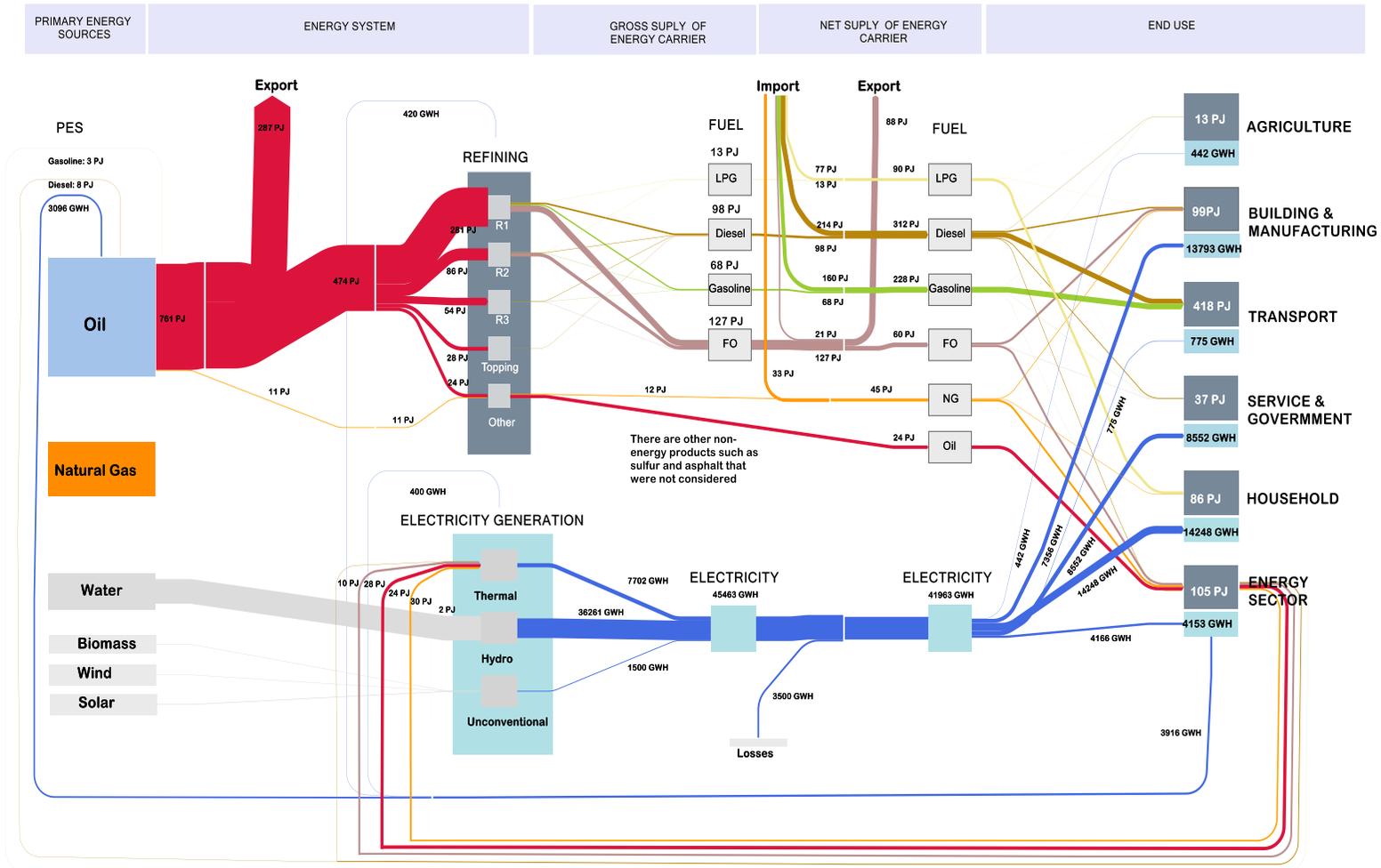
Los campos de gas natural (Amistad) no fueron considerados como una alternativa de PES, ya que su producción finalizará entre 2021 a 2022 de acuerdo a cifras oficiales de la Empresa Pública EP Petroamazonas. En la misma línea, existe un aporte marginal de gas natural asociado a la producción de petróleo que llega a 12 PJ.

Conocer el comportamiento del gas asociado dentro de la extracción de petróleo es también de importancia para las instituciones gubernamentales ya que el Estado cuenta con una política de utilización de gas asociado para la generación de electricidad en lugar de diésel y petróleo para alimentar de energía al sistema de extracción, por lo que una disminución de gas asociado pondría en desuso la infraestructura instalada y se incrementarían las importaciones de diésel.

La capacidad de procesamiento en los centros de refinación es estática con 9,8 M m³ de petróleo y su factor de operación fluctúa entre el 85 a 90 % en el año, es decir en las refinerías se procesan 475 PJ de petróleo para producir 13 PJ de LPG, 98 PJ de diésel, 68PJ gasoline y 127 de fuel oil, existen otros productos que no son energéticos como el azufre y asfalto que no fueron considerados en el balance.

El subsistema muestra que la producción de energy carrier en las refinerías no es suficientes para abastecer la demanda nacional de combustibles y por otro lado produce el 42 % de Fuel Oil que es un energy carrier de baja calidad.

Figura 4-8: Sistema de energía del Ecuador al 2035¹³



Elaborado: Rony Parra J.

¹³ Consideraciones de la política energética para el desarrollo del escenario a) cierre del campo Amistad de gas natural, b) Política de importación de gas natural, c) Ampliación de la generación hidroeléctrica, d) Política del aprovechamiento de gas asociado de la extracción de petróleo para la generación eléctrica.

Mientras las exportaciones de petróleo se reducen a 287 PJ, las importaciones de combustibles suben para cubrir el incremento de la demanda de los sectores socioeconómicos. Se requiere importar 77 PJ de GLP que representa el 86 % de total del consumo, 214 PJ de diésel que representa el 69 % del total de consumo, 160 PJ de gasolina que representa el 70% del consumo nacional. Para la comercialización de Fuel Oil se requiere importar 21 PJ de combustible para mezclarlo y mejorar su calidad, finalmente se consume en el mercado interno el 40% y la diferencia se exporta. En cuanto al gas natural el estudio contempla una política de importación de 32,9 PJ que equivale a 90 Millones de pies cúbicos de gas natural (capacidad máxima de transporte por el gasoducto “Amistad-Bajo Alto”) para la generación térmica de electricidad, abastecimiento en los sectores industriales y parte para el sector residencial.

En el escenario propuesto, el sistema de generación eléctrica produce 45.463 GWH de energía bruta, y está compuesto por 36.261 GWH de hidroelectricidad que representa el 80%, 7.702 GWH de generación térmica que equivale al 17 % y 1.500 GWH de electricidad de fuentes no convencionales que corresponde al 3 % del total de generación. El sistema actual en generación hidroeléctrica y de fuentes no convencionales no será suficiente para abastecer la demanda al 2035. Por ejemplo, la capacidad instalada actual de generación hidroeléctrica del Ecuador es de 4.486 MW y a condiciones máximas de operación el sistema producirá 31.437 GWH en un año, mientras que la capacidad de generación con fuentes no convencionales debe crecer por lo menos a 350 MW para satisfacer la demanda nacional de electricidad.

Los resultados del escenario muestran los desafíos del sector hidroeléctrico, dado que el aumento en cerca del doble de generación hidroeléctrica al 2035 obliga al Estado a:

- i. Analizar la suficiencia de los caudales y ubicaciones de las cuencas hidrográficas que se pueden utilizar para instalar las centrales hidroeléctricas y producir la cantidad de energía requerida.
- ii. Fortalecer la infraestructura de generación para incrementar la producción de electricidad con la capacidad instalada actual, además de construir y mejorar las redes de transmisión para evacuar el incremento de electricidad.
- iii. Buscar el financiamiento para cubrir la inversión requerida para este cambio (nueva central eléctrica y reestructuración de la red) en tan poco tiempo, y

- iv. Discutir sobre la permanencia de las tarifas de electricidad teniendo en cuenta las inversiones en el sector eléctrico, mayor importación de combustibles y menores ingresos por la extracción del petróleo.

Con el incremento del consumo de energía en el *end use matrix* es indudable que las emisiones de CO2 también crecerán en el sistema. Utilizando la metodología planteada por el IPCC e identificando las equivalencias de emisiones para los combustibles que se comercializan en el Ecuador (Meijer & Pullus, n.d.; Parra Narváez, 2015), las emisiones posibles si se combustiona el total de la demanda de fuel pasarían de 38.938 Kton CO2 del 2017 a 59.618 Kton CO2 en el 2035, es decir el sistema crecerá en un 50% en 18 años.

Figura 4-9: Emisiones de CO2

Net supply fuel -Kton CO2			Energy system-Kton CO2 2035	
Fuel	2017	2035	Fuel system	4825
LPG	3218	5679	Oil extraction	4454
Gasoline	10573	15559	Gas burning	1055
Diesel	16277	25124	Electricity generation	2732
FO	5580	8973	Mechanical energy	667
Natural gas	1459	2525	Refineries	371
Oil	1833	1759	Electricity generation	371
Total	38938	59618	Electricity system(includes the electric generation of the fuel system)	6477
Equivalences: NG: 56,1 KtonCO2/PJ; Gasoline: 68 KtonCO2/PJ; Diesel:80 KtonCO2/PJ; FO:150 KtonCO2/PJ; LPG:63 KtonCO2/PJ (Meijer & Pullus, n.d.; Parra Narváez, 2015;EPA,2019)			Thermal Generation	6477
			LPG	126
			Diesel	741
			FO	2167
			Oil	1759
			Natural gas	1683

Elaborado: Rony Parra J.

Además, al 2035, el sistema de extracción de petróleo producirá 4.454 Kton CO2 para extraer 761 PJ de petróleo, considerando la generación de energía térmica, quema de gas en los mecheros y uso de combustibles para generación de energía mecánica. Esta cantidad representa una reducción de las emisiones del 40% con respecto al 2017, sin embargo, no obedece a una mejora tecnológica, sino a la reducción del tamaño del sistema por el agotamiento de producción de petróleo, explicado arriba. Por su parte el sistema nacional de generación de electricidad emanará 6.477 Kton CO2 cifra similar a la emitida en el 2017 pese a incrementar la producción de electricidad a 41.963 GWH, en este caso

existe la mejora en el mix de generación para la hidroelectricidad representando el 80 % de la generación total del sistema.

4.6. Discusión y conclusiones

El proceso secuencial de contabilidad metabólica presentado en este documentó para el caso del sistema energético del Ecuador, pretende ser una alternativa de herramienta para la construcción de escenarios futuros de electricidad y fuel en los sistemas de energía de los países, entendiendo las limitaciones biofísicas de escasez de los recursos y de sumidero ambiental (emisiones GEI).

Este proceso elimina la discrecionalidad de las proyecciones tradicionales ya que al determinar los EMRi, los actores de la política pueden identificar las características esperadas y las soluciones tecnológicas adoptadas en los diferentes subsectores de la economía. Esto permite una mejor anticipación del tipo de cambios que se asociarán con el crecimiento de la intensidad energética y en qué sectores se concentrará la mano de obra. Además, para mejorar el entendimiento, se conserva siempre las especificidades de los energy carrier (electricidad y fuel) en todo el balance, una distinción que permite el análisis de diferentes soluciones técnicas en la expresión de usos finales.

El caso de estudio muestra una reducción de la producción de petróleo del 51% comparado con los niveles del 2017 y su estructura demográfica señala una composición con menor calidad del petróleo futuro, principalmente por el agotamiento de reservas de petróleo liviano y medio. Esto tiene implicaciones en varias líneas de política, debido a:

- i. Menor cantidad y calidad del excedente del petróleo para las exportaciones.- se tendrá 287 PJ de petróleo pesado en lugar de 887 PJ de petróleo medio que se exportó en 2017, lo que conlleva a tener menores ingresos para las finanzas públicas,
- ii. El cambio en la calidad del petróleo dificultará aún más el proceso de refinación y la producción de fuel.- las tres principales refinerías del Ecuador cuentan con infraestructura para procesar petróleos livianos y medios, sin embargo la

producción de petróleo medio de 8,7 Mm³ no será suficientes para abastecer la demanda de 9,8 Mm³ en las refinerías, y

- iii. La producción de petróleos de menor calidad complejiza la extracción y el procesamiento.- lo cual se ve reflejado en el incremento de energía por unidad de producción entre el 2017 y 2035 pasando de 163,7 a 206,9 KWH/m³ en electricidad y de 2,5 a 3 GJ/m³ en fuel.

Existe problemas complejos sobre el abastecimiento de derivados del país, la producción de 306 PJ de fuel no es, ni será suficiente para abastecer la demanda nacional de 758 PJ al 2035. Las refinerías producen el 42 % de residuo (Fuel Oil) y combustibles con alta cantidad de azufre, razón por la cual las normas INEN-1489 y 935 muestra una permisibilidad para la comercialización de combustibles de hasta 500 ppm de Azufre en diésel y 650 ppm en gasolinas (INEN, 2019), estos parámetros son elevados si lo comparamos con países europeos con calidad de combustibles EURO 5 con permisibilidad de 10 PPM de azufre en los combustibles.

El Estado tiene dos opciones para brindar la seguridad en el abastecimiento de energía, por un lado, interiorizar los requerimientos (mejorar la infraestructura de las refinerías y construir nueva capacidad de procesamiento) para lo cual es de importancia conocer la cantidad, calidad de petróleo y la estructura de los combustibles futuros que servirán para el diseño de las nuevas refinerías, aportes mostrados en este artículo y por otro exteriorizar sus requerimientos de energía para lo cual es eminente mejorar la infraestructura en almacenamiento y mantener una fuerte posición de comercio exterior que gestione los requerimientos de fuel de manera oportuna.

El sistema de generación de electricidad muestra un incremento de 28.083 GWH de energía bruta producidos en el 2017 a 45.463 GWH en el 2035. El escenario contempla la ampliación del mix de generación hacia la hidroelectricidad y energías renovables, mientras que la generación térmica se reduce del 26% al 17% del total de generación de electricidad, lo cual permite mantener las emisiones de CO₂ en los niveles del año base de 6.477 Kton CO₂, sin embargo si se analiza la situación del sistema nacional, el crecimiento de la población y los cambios de la intensidad de energía en los subsectores socioeconómicos muestran un incremento de la demanda de fuel a 758 PJ, lo que implica

un aumento de las emisiones de CO₂ del 52 %, pasando de 38.938 Kton CO₂ del 2017 a 59.618 Kton CO₂ en el 2035.

4.7. Referencias

- Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero ARCH, 2018. Producción fiscalizada 2010-2018. Disponible en: <https://www.controlhidrocarburos.gob.ec/>
- BP p.l.c., 2019. BP Energy Outlook 2019 edition The Energy Outlook explores the forces shaping the global energy transition out to 2040 and the key uncertainties surrounding that. BP Energy Outlook 2019.
- Castro Verdezoto, P. L., Vidoza, J. A., & Gallo, W. L. R., 2019. Analysis and projection of energy consumption in Ecuador: Energy efficiency policies in the transportation sector. *Energy Policy*, 134(November 2018). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110948>
- EL Comercio, 2020. Metro de Quito y Tranvía de Cuenca presentarán un proyecto de ley a la Asamblea Nacional: <https://www.elcomercio.com/actualidad/metro-tranvia-cuenca-proyecto-ley.html>
- ERIRAS, 2019. Global and Russian Energy Outlook up to 2040. 173.
- Equinor, 2019. Energy Perspectives 2019. Long-term macro and market outlook
- Fontaine, G., Fuentes, J. L., & Narváez, I., 2019. Policy mixes against oil dependence: Resource nationalism, layering and contradictions in Ecuador's energy transition. *Energy Research and Social Science*, 47(September 2018), 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.08.013>
- Fustier, K., Gray, G., Gundersen, C., & Hilboldt, T., 2016. Global oil Supply. HSBC Global Research, (September 2016), 54. Retrieved from <https://www.research.hsbc.com>
- Giampietro, M., Mayumi, K. & Sorman, A.H., 2012. The Metabolic pattern of societies : where economists fall short. London: Routledge
- Giampietro, M., Diaz-Maurin, F., 2014b. The Energy Grammar. In: Giampietro, M., Aspinnall, R.J., Ramos-Martin, J., Bukkens, S.G.F. (Eds.), Resource Accounting for Sustainability: The Nexus between Energy, Food, Water and Land Use. Routledge, Abingdon, pp. 90–115.

- Giampietro M, Sorman AH., 2012. Are energy statistics useful for making energy scenarios? *Energy*;37:5e17.<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.038>
- Greenpeace, 2019. <https://www.greenpeace.org/international/>
- Hidrocarburos, S. de. (2017). *Revista-Informe-Anual-del-Potencial-Hidrocarburífero-2017.pdf*.
- IEEJ Outlook 2020, 2020. The Institute of Energy Economics. Retrieved from <http://www.ewi.uni-koeln.de/>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2018. ¿Cómo crecerá la población en Ecuador? *Proyecciones Poblacionales*, 1–38. Retrieved from <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2012. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489. Productos derivados del petróleo. Diésel. Requisitos
- Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, 2016. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 935. Productos derivados del petróleo. Gasolina. Requisitos
- International Energy Agency IEA, 2019. *Energy Technology Perspectives*. <https://www.iea.org/topics/energy-technology-perspectives>
- International Energy Agency, 2018. *World Energy Outlook 2018: Highlights*. 23–28. <https://doi.org/10.1787/weo-2018-2-en>
- IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2 (Energy)*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland
- Meijer, J., & Pullus, T. (n.d.). 2 *Energía. Orientación Del IPCC Sobre Las Buenas Prácticas y La Gestión de La Incertidumbre En Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*, 1–103.
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables-MERNNR, 2016a. *Plan maestro de electrificación, 2016-2025*.
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables-MERNNR, 2016b. *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035*.
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables MERNNR (2019). <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/5900-2/>
- Odum, H.T., 1996. *Environmental Accounting: Emery and Environmental Decision Making*. John Wiley, New York.
- Organización Latinoamericana de Energía OLADE, 2019. *Presentación sobre las Perspectivas Energéticas*. Seminario Internacional de Innovación y Retos

- Tecnológicos del Sector Energético en la Cuarta Revolución Industrial. Quito-Ecuador 2019
- Parra Narváez, R., 2015. Factor de emisión de CO₂ debido a la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001-2014. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 7(2). <https://doi.org/10.18272/aci.v7i2.269>
- Parra, R., Di Felice, L. J., Giampietro, M., & Ramos-Martin, J., 2018. The metabolism of oil extraction: A bottom-up approach applied to the case of Ecuador. *Energy Policy*, 122(July), 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.017>
- Pinzón, K., 2018. Dynamics between energy consumption and economic growth in Ecuador: A granger causality analysis. *Economic Analysis and Policy*, 57, 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2017.09.004>
- Posso, F., Sánchez, J., Espinoza, J. L., & Siguencia, J., 2016. Preliminary estimation of electrolytic hydrogen production potential from renewable energies in Ecuador. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 2326–2344. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.155>
- Rogelj, J., Den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., ... Meinshausen, M., 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °c. *Nature*, 534(7609), 631–639. <https://doi.org/10.1038/nature18307>
- The Institute of Energy Economics, Japan – IEEJ, 2020. <https://eneken.ieej.or.jp/en/>
- United States Environmental Protection Agency EPA, 2019. Greenhouse Gases Equivalencies Calculator - Calculations and References [.https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references](https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references)
- Velasco-Fernández, R. (2017). The pattern of Socio-Ecological Systems. Thesis Phd.
- Velasco-Fernández, R., Giampietro, M., & Bukkens, S. G. F. (2018). Analyzing the energy performance of manufacturing across levels using the end-use matrix. *Energy*, 161, 559–572. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.122>
- World Energy Council-WEC, 2019. <https://www.worldenergy.org/g>

Conclusiones

En el desarrollo de esta investigación, se abordaron temas de carácter teórico y conceptual, alternativas metodológicas y aplicaciones empíricas, para entender los sistemas de energía desde la fuente primaria (extracción de petróleo) y su relación con la sociedad y los ecosistemas. Este trabajo fue realizado bajo una perspectiva biofísica inherente de los sistemas complejos, sin reducir la comprensión de los fenómenos a los análisis tradicionales unidimensionales de la economía clásica que intentan entender el todo de la realidad; es decir, en este estudio se interpreta parte de la realidad aceptando la identidad del sistema propuesto por la observación. A continuación, se presentan las principales conclusiones acorde a las preguntas que guiaron esta investigación:

Partiendo del entendimiento de la sostenibilidad como una interacción de los sistemas socioeconómicos y los sistemas ecológicos en donde las funciones ecológicas brindadas por la biósfera no pueden ser reproducidas en la tecnósfera por el control del ser humano, los estudios biofísicos ayudan a la comprensión del funcionamiento de los sistemas humanos en el cual un rendimiento sostenido de materiales y energía proveniente de los ecosistemas hace posible que las sociedades humanas evolucionen, usando y transformando los sistemas económicos para garantizar la reproducción de las sociedades.

En referencia a los estudios energéticos, la recolección, depuración y el análisis de información adicional que brindan los estudios biofísicos ayudan a la comprensión holística sobre la sostenibilidad, asumiendo reales las limitaciones naturales del entorno como la *escasez de los recursos energéticos* (ejemplo: reservas de petróleo y gas o agua), la *capacidad de absorción y regeneración* de la naturaleza para el aprovechamiento de esos recursos en la sociedades (ejemplo: sumidero de desechos y emisión de GEI) y las *limitaciones internas*, expresadas como las restricciones metabólicas internas del sistema dado por la tipología de las organizaciones en los modelos socioeconómicos, en los cuales

se distribuyen de manera selectiva los recursos energéticos (combustibles /electricidad y calor) para la producción de bienes y servicios, que son consumidos por las sociedades.

En la discusión de sostenibilidad, el sistema depende fundamentalmente de los flujos de energía, materiales y los servicios ambientales para mantener la salud de las sociedades. La provisión de energía se asocia a la dinámica de flujos en la red metabólica de energía y a la vez, esta se encuentra condicionada al tamaño y tipo de la fuente primaria de energía para garantizar el provisionamiento de energy carrier intermedios y finales en los sistemas socioeconómicos.

Para esta investigación se emplearon los principios de MuSIASEM, como una herramienta que aglutina varias disciplinas de la ciencia como: la complejidad, economía biofísica, teoría de la jerarquía, teoría postnormal, entre otras, que permiten comprender la relación entre la sociedad, economía y la naturaleza a través del intercambio de flujos de materiales y energía; además, posibilita el estudio del rendimiento de la extracción del petróleo como fuente primaria de energía, necesaria para garantizar el suministro de productos intermedios y finales, y con ello la permanencia de los sistemas socioeconómicos.

MuSIASEM es un esquema contable que permite la vinculación de variables biofísicas y socioeconómicas de manera integrada. Esto hace posible unir dos puntos de vista no equivalentes del patrón metabólico de una sociedad: a) el punto de vista externo que trata las posibles limitaciones ambientales, como la disponibilidad de recursos y la capacidad de absorción de residuos (factibilidad del patrón metabólico de acuerdo con las características de procesos fuera del control humano); y b) la visión interna que se ocupa de posibles limitaciones técnicas y económicas, como los coeficientes técnicos y la exigencia de factores de producción (viabilidad del patrón metabólico de acuerdo con las características de los procesos bajo control humano).

Apoyados en los principios de MuSIASEM, en el transcurso del trabajo de investigación se desarrollaron metodologías de contabilidad biofísicas que ayudan a la comprensión del metabolismo de la fuente primaria de energía, como alternativa a los Análisis de Ciclo de Vida-ACV, Análisis de Costo-Beneficio, y la tasa de retorno energético, EROI por sus siglas en inglés (Energy Return On Investment).

En primer lugar, se realizó un marco metodológico para describir el proceso de extracción de petróleo, utilizando los conceptos de procesadores y ruta secuencial metabólica, se analizó la relación entre los elementos funcionales y estructurales para luego generar una contabilidad de flujos y fondos de manera ascendente. En este proceso se describió la ruta secuencial de procesadores para la cadena de combustible, comenzando por la extracción de petróleo y terminando con la distribución de combustibles para los usos finales en la sociedad. Aquí, la salida de un procesador se convierte en una entrada para el siguiente, y cada procesador que cumple una determinada función (por ejemplo, "extracción de petróleo") puede asignarse a diferentes procesadores estructurales (por ejemplo: extracción de petróleo en aguas profundas) que describen un proceso a partir de una tecnología o método específico.

El procesador funcional de extracción de petróleo opera en un nivel de análisis más bajo, dividiendo el procesador funcional de extracción de petróleo en dos subfunciones adicionales: extracción de petróleo medio y extracción de petróleo pesado (gravedad API). Para cada subfunción se identificó diferentes estructuras de extracción de petróleo, dependiendo de la cantidad de agua y sedimentos (BSW) generada en el proceso de extracción. Se crearon procesadores para cada elemento estructural, mapeando los flujos y fondos de entrada y salida, y se procedió a escalar desde el nivel más bajo hacia el agregado nacional.

El estudio de caso en Ecuador mostró que es posible generar información importante para el ciclo de la política pública en cualquiera de sus fases o en todas. A nivel nacional la extracción de petróleo está cobrando cada vez más importancia en las políticas y perspectivas económicas y los datos presentados aquí pueden ayudar a tomar decisiones informadas, por ejemplo, sobre los fondos y flujos necesarios para materializar la extracción de petróleo futuro. El conjunto integrado de relaciones de procesadores construidas de abajo hacia arriba con datos de Ecuador puede ajustarse y aplicarse a otros países, mediante el uso de diccionarios que describan las características de los procesadores en diferentes contextos, ya que las tecnologías y métodos de extracción de petróleo pueden generalizarse.

Además, se desarrolló un método de contabilidad alternativo y novedoso basado en el análisis relacional para evaluar el desempeño de la extracción de petróleo convencional

en cualquier momento del tiempo y sus implicaciones ambientales bajo el nexo energía-agua. El análisis relacional mostró que al establecer una relación entre las características de los campos petroleros explotados (tipo de petróleo, edad del campo y BSW) y los inherentes al proceso de extracción (requerimiento de los portadores de energía, mano de obra, agua dulce, capacidad de generación de energía, emisión de GEI y producción, recirculación y depósito del agua contaminada), se puede anticipar cambios en el rendimiento del sistema de extracción de petróleo en diferentes puntos en el tiempo y espacio.

El método se basó en la diagramación del procesador extendido en el cual se distinguieron: a) las características de la fuente primaria de energía-petróleo (viscosidad, ubicación y la profundidad del stock, y la cantidad relativa de agua de formación); b) el perfil de las entradas externas requeridas por la tecnosfera para el proceso de explotación, incluye el nivel de capacidad de potencia de la tecnología seleccionada de extracción, insumos de mano de obra e insumos externos de electricidad y combustibles no obtenidos del ciclo interno de explotación; c) el intercambio de entradas y salidas con el entorno natural (biosfera) en el proceso de explotación, incluyen flujos como agua, gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes que representan las presiones ambientales asociadas con la operación de extracción de petróleo y; d) los lazos internos (internal loop) de energía y agua dentro del proceso de explotación.

El uso simultáneo de diferentes métricas para evaluar los flujos de los portadores de energía de diferente calidad y de los flujos de agua que entran y salen del proceso, así como la inclusión de los elementos necesarios del fondo (mano de obra y capacidad de potencia) permiten al analista rastrear características relevantes de proceso en relación con su dimensión socioeconómica y ecológica.

En este estudio se generaron algoritmos del contenido de BSW versus las curvas de edad, para cada tipo de campo petrolero por calidad API, con lo cual no solo permitieron caracterizar el rendimiento de los campos petroleros a pesar de la falta de datos (en términos del perfil de entradas y salidas de sus procesadores), sino que también permiten anticipar los cambios esperados en el rendimiento futuro de los campos petroleros. Este proceso es clave para evaluar los rendimientos esperados y la intensidad de la presión ambiental.

El análisis relacional de la red metabólica evita la generación de resultados potencialmente engañosos y permite una discusión sobre la relevancia y credibilidad de los supuestos subyacentes al marco del análisis cuantitativo; además, contextualiza las diversas evaluaciones técnicas en relación con: a) el desempeño general del sistema; b) el desempeño específico de las áreas geográficas; c) el desempeño funcional de combinaciones específicas de procesos; y d) el estado del arte de las tecnologías utilizadas para llevar a cabo procesos locales específicos.

El estudio metodológico fue aplicado al caso de Ecuador, analizando a detalle el comportamiento metabólico de la extracción de petróleo y mirando sus implicaciones en un nivel superior en el sistema de energía nacional, para finalmente discutir los hallazgos en términos de política. Se realizaron visualizaciones sincrónicas para observar el cambio del rendimiento de la extracción multinivel (campo, bloque, tren prospectivo y agregado nacional), visualización diacrónica, para observar el rendimiento del sistema durante un período de tiempo determinado en un nivel de análisis jerárquico específico (nivel-n; 1972-2018); además, de un esquema de criterios múltiples a nivel de campos de petróleo para la generación de criterios relevantes para informar la toma de decisiones.

Respondiendo las preguntas de investigación ¿cómo cambia el rendimiento de los flujos y fondos biofísicos en la extracción de petróleo, mientras envejecen los campos de petróleo? y ¿cómo cambia la presión ambiental con el deterioro de la extracción de petróleo?; este estudio demostró un incremento del tamaño referencial del sistema nacional de extracción de petróleo a causa de la producción de petróleo crudo (suministro de petróleo + volumen de agua producida + gas asociado), y una menor calidad del recurso lo cual se ve reflejado en el incremento de la intensidad de las entradas y salidas en los procesadores (cambio de la extracción de petróleo liviano y medio a pesado).

Analizando la presión sobre los ecosistemas entre 1975 a 2018 se observa que por cada metro cubico de petróleo que se extrajo, los requerimientos biofísicos externos se intensificaron en términos de consumo de agua dulce (+ 48%), sumidero de aguas contaminadas (+2911%) y la emisión de GEI (+ 203%).

Para entender las implicaciones del sistema de extracción de petróleo y su incidencia en el sistema energético futuro del Ecuador, se construyó un escenario al 2035, entendiendo la dinámica metabólica de escasez de la fuente primaria de energía y de las necesidades energéticas de los subsistemas socioeconómicos (electricidad y combustibles) dado por las tasas metabólicas exosomáticas de la matriz de uso final en la gramática MuSIASEM.

El caso de estudio demuestra una reducción de la oferta de petróleo del 51% comparado con los niveles del 2017 y su estructura demográfica expone el cambio de las reservas de petróleo liviano y medio por petróleo pesado, lo cual trae implicaciones al sistema nacional de energía y a la política pública.

Por ejemplo, el deterioro en términos de volumen y calidad del petróleo esperados afectarán a los ingresos fiscales por exportación de petróleo, a la producción de combustibles en las refinerías diseñadas para procesar petróleos livianos y medios, y como se evidenció en los capítulos anteriores el deterioro en calidad del petróleo complejizará el proceso de extracción, lo cual se ve reflejado en el incremento de energía por unidad de producción entre el 2017 y 2035 pasando de 164 a 207 KWH/m³ en electricidad y de 2,5 a 3 GJ/m³ en combustibles. En términos de la demanda, el sistema muestra un incremento de electricidad y combustibles a 45 mil GWH y 758 PJ respectivamente y un incremento del 52% en la emisión de GEI (al 2035 será 59,618 Kton CO₂).

Este trabajo debe tomarse como un ejercicio de aproximación a la disponibilidad y a la necesidad de energía del sistema socioeconómico del Ecuador al 2035, ya que es necesario refinarlo con los involucrados para que sirva como instrumento de toma de decisiones a nivel de política energética. El objetivo del autor no fue informar sobre la política sino mostrar las bondades del método para la construcción de escenarios futuros de energía observando las entradas y salidas de flujos primarios, intermedios y finales de energía y la presión ambiental inherente al sistema.

Finalmente, se cumplió con el propósito de esta investigación, desarrollando herramientas analíticas capaces de ampliar el entendimiento de los problemas de sostenibilidad que atañen a los sistemas energéticos actuales, analizando a profundidad el rendimiento de la

extracción de petróleo como fuente primaria de energía y su relación con la sociedad, identificando sus limitaciones biofísicas en términos de escasez del recurso y sumidero ambiental. Además, se logró la construcción de una gran base de datos en términos biofísicos de más de 130 mil metadatos para entender el rendimiento del sistema de extracción de petróleo y continuar con las investigaciones en el área energética.

ANEXOS

Anexo 1: Información complementaria para el Capítulo III

Exploration of the Environmental Implications of Ageing Conventional Oil Reserves with Relational Analysis

SUPPLEMENTARY MATERIAL

1. Use of processors and grammars in relational analysis
2. Sudoku effect and uncertainty propagation
3. Computational structures for filling data gaps: generating unitary processors
4. Characteristics of the oil exploitation process by oil prospect, extracted oil quality (API: light, medium, and heavy) and age structure of oil fields for 2018 (Table S1)
5. References

1. Use of processors and grammars in relational analysis

In relational analysis, a grammar is defined as a set of expected relations between semantic and formal representations. It responds to the challenge of how to give an operational structure to a semantic representation (a perception of a given issue) that can be translated into a quantitative representation (Giampietro et al., 2012). Grammars thus describe relations over metabolic processors of structural and functional elements defined across different levels of analysis (see Fig. S1). The metabolic processors, in turn, are defined by data arrays. Because of the semantic openness of relational analysis, grammars can only be formalized using *computational structures*, rather than equations.

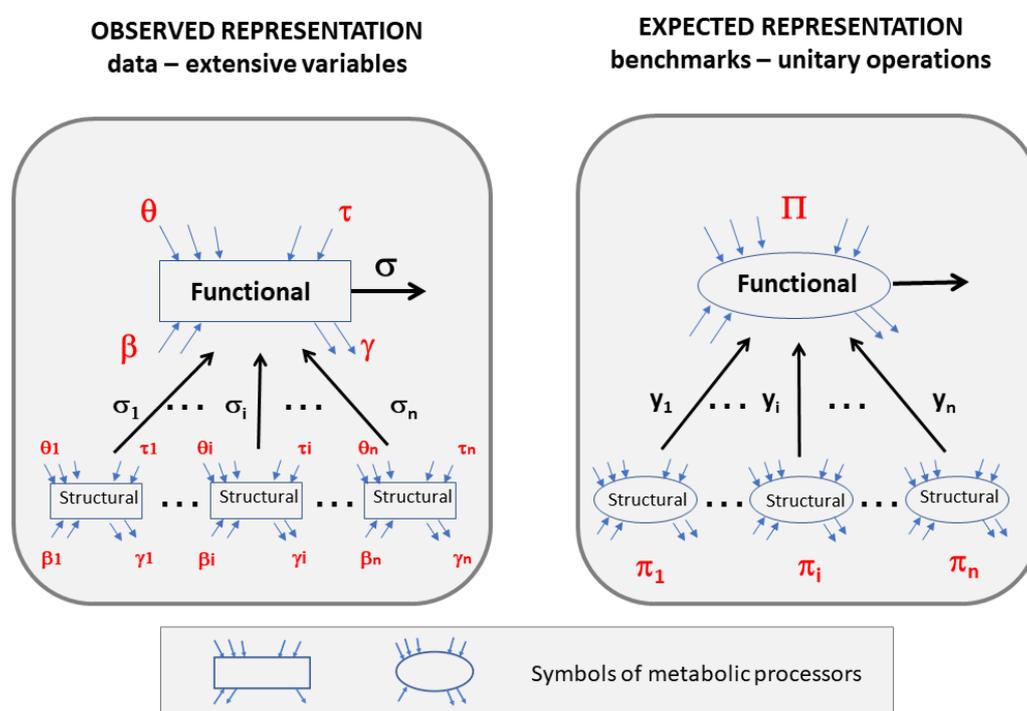


Figure S1: Basic grammars describing the relation between structural and functional elements using either observed data (on the left) or benchmarks (on the right).

We distinguish between two different types of grammars, as shown in Figure S2: (i) functional aggregations over different types of processes (upper part); (ii) sequential pathways (bottom part). For example, the functional unit “oil production” in the upper part of Fig. S2 is based on a semantic definition of a criterion of aggregation as “something capable of supplying a given mix of heavy, medium and light oil”. This definition is distinct from that used in the sequential pathway (bottom part). In the

sequential pathway, the various processes described by processors are connected by a common throughput. In this case, it is the tracking of the throughput that identifies the various processors to be aggregated in the functional unit. Note that in the present study, only functional aggregations were used.

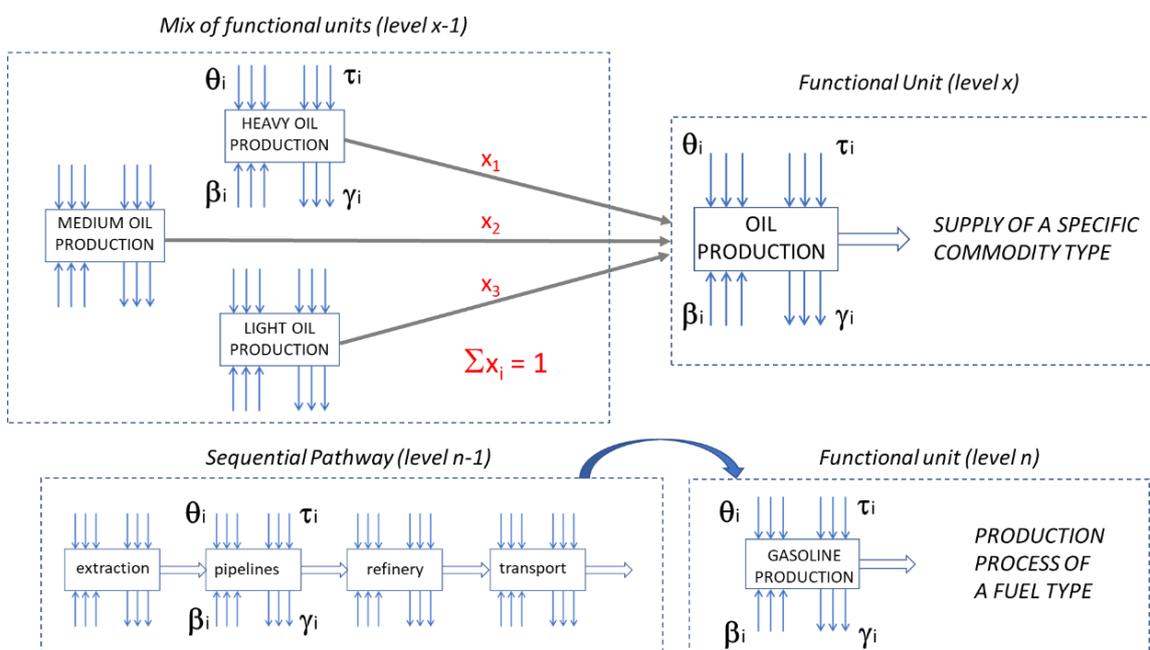


Figure S2: Examples of grammars establishing relations over metabolic processors describing structural and functional elements in different logics of representation (the sequential pathway shown at the bottom has not been used in this study and is for illustrative purposes only).

Once the set of relations is defined in semantic terms, we can move to the formal representation of the set of declared relations. Using the selected grammar we can calculate an expected profile of inputs and outputs for a functional unit defined at a higher hierarchical level (e.g., level x or n in Fig. S2), starting from the knowledge of the identities of the various processors at the lower hierarchical level (e.g., $x-1$ or $n-1$ in Fig. S2) that compose this functional unit, and their relations in the grammar (their relative contribution/importance). To this purpose, it is of paramount importance that all the metabolic processors are described using the same set of inputs and outputs. Following, we explain this process more in detail for the functional aggregation.

As illustrated in detail in Fig. S3, the metabolic processor describes five different categories¹⁴ of inputs and outputs. Three of these categories refer to interactions that the metabolic processors have inside the technosphere (secondary flows coming from and going into the society and relating to spheres B and D in Fig. 3-1 in the main text), namely:

τ_i = required secondary flows;

θ_k = required secondary funds;

σ = supply given to society.

In our accounting, the secondary flows (τ_j) are electricity, fuels for electricity, and fuels for use as such ($j=1,2,3$); the secondary funds (θ_k) are labour and power capacity ($k=1,2$); the supply to society (σ) is the type and quantity of oil supplied by the process.

The other two categories refer to the interactions that the metabolic processor has with the biosphere embedding the technosphere and relate to spheres A and C in Figure 3-1 of the main text:

β_z = requirement of primary flows;

γ_m = wastes/emissions requiring the presence of sinks.

In our accounting, the required primary flows (β_z) are the extracted crude from the field and fresh water input for the extraction process ($z=1,2$); the flows of wastes and emissions (γ_m) are the oil produced water disposed of and GHG emission ($m=1,2$).

¹⁴ In line with MuSIASEM, our analysis builds on Georgescu-Roegen's flow-fund model (Georgescu-Roegen, 1971) and distinguishes between flows and funds in the inputs/outputs. While flow elements identify what the system does, fund elements represent what the system is. Fund elements maintain their identity over the course of time of the analytical representation to which they pertain. Examples of fund elements include human labor and power capacity. On the other hand, flow elements change their identity during the analytical representation—they either enter (inputs) or leave (outputs) the representation to which they pertain. Examples of typical flow elements include energy carriers, GHG emission and water.

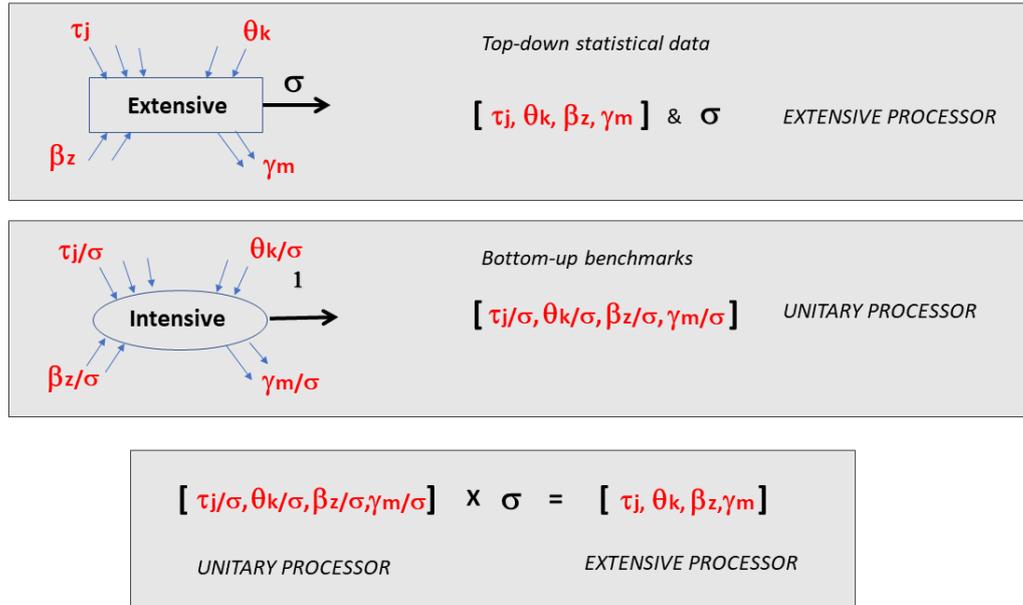


Figure S3: Detailed description of the extensive and unitary metabolic processor and the relationship between them.

In the left-hand basic grammar in Fig. S1—the observed representation, based on extensive processors, we can simply sum the corresponding inputs and outputs (liters of freshwater to liters of freshwater, tons of GHG to tons of GHG, etc.) and oil supply across the composing lower-level processors to obtain the metabolic processor (extensive values) of the higher-level functional unit. However, we can also generate a different, more useful type of representation, i.e., the expected representation based on benchmarks, illustrated on the right-hand side of Figure S1. The expected representation is based on unitary operations (per unit of oil supply) and uses the relative weight (importance) of the lower-level processors in terms of oil supply. We therefore have to calculate: (i) benchmark values describing the unitary metabolic processors (π_i) for each lower-level element by dividing the various inputs and outputs of its processor by its oil supply (σ_i); and (ii) the fractions of the total oil supply (σ) contributed by each metabolic processor ($y_i = \sigma_i/\sigma$). Note that, when crossing levels of analysis, closure must be kept over the relative contributions of the composing elements to the oil supply of the higher-level functional unit. Thus, the identity of the unitary metabolic processor of the higher-level functional unit (π) can be derived from the identity of the unitary metabolic processors of the composing structural elements (π_i). This bottom-up process is detailed in Figure S4.

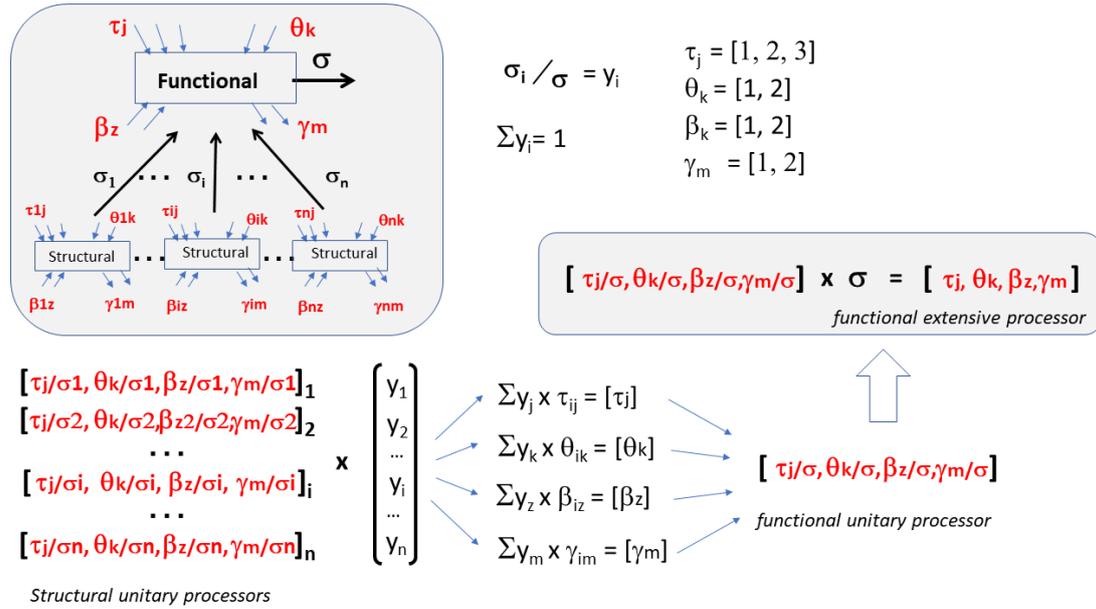


Figure S4: The computational structure for deriving a unitary and extensive processor for a functional unit from the processors of the composing structural elements (bottom-up approach).

Note that the representation on the right hand of Fig. S1 gives benchmarks expressed in terms of unitary operations. These no longer relate to the tangible entities (instances) but to types. This makes this representation particular useful for scenario analysis by introducing changes in the existing set of relations. For instance, by changing either (i) the vector $[y_i]$ – i.e. assuming a different relative contribution of the various structural types in the expression of the function; or (ii) one or more of the unitary processors of the structural types composing the higher-level functional unit (e.g., expected deterioration of performance with age of specific oil fields; experimentation of new technologies in specific fields). In this way, relational analysis allows to explore options of change and their expected impact on the overall performance.

Figure S5 shows one of the grammars used in the Ecuador case in more detail: i.e., a functional aggregation across oil fields (structural elements), blocks and prospects, to arrive at the overall representation at the nation level. As described earlier, this aggregation process can be done either on the basis of extensive or unitary processors. However, note again, that relational analysis aims at studying *typologies* of quantitative relations over structural and functional elements in the energy system rather than

measurements of the characteristics of specific realizations (instances). This is relevant for the robustness of the analysis and propagation of uncertainty (see next section).

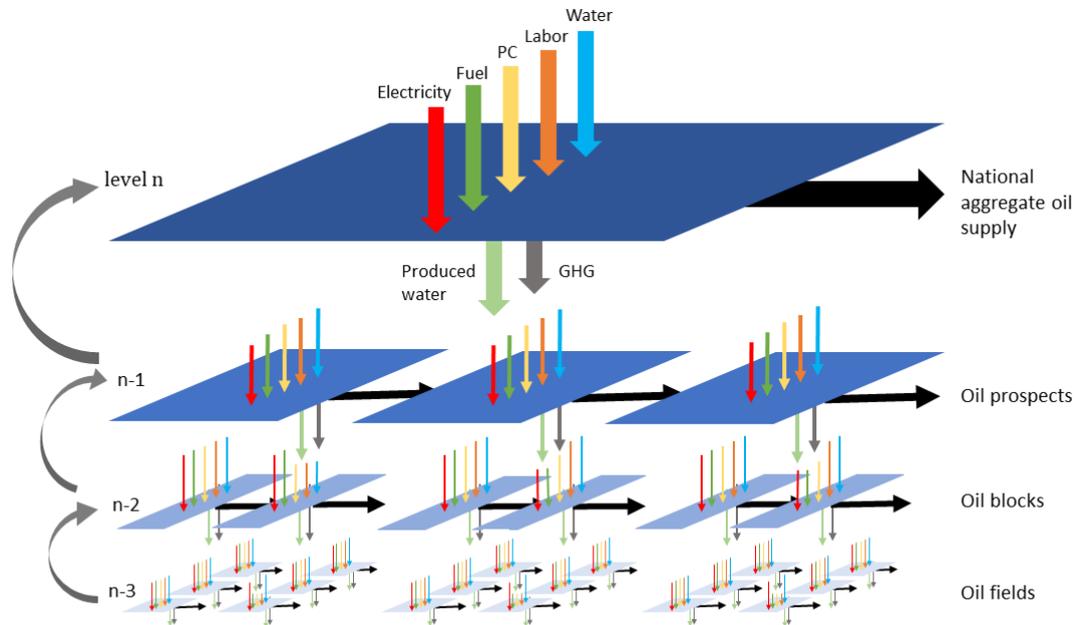


Figure S5: Geographic scaling of biophysical processors characterizing the oil supply of Ecuador at a given point in time. The geographic scales (field, block, prospect, and nation) are defined in section 2.4 of the main text. Water 1 is produced water, water 2 the fresh water requirement for the extraction process.

2. Sudoku effect and uncertainty propagation (supplement to section 3.2)

Like in any other analysis, relational analysis is subject to errors and uncertainty in the analysis related to the reliability of the individual data used as inputs. This concerns the natural variability in or measurement errors of the inputs/outputs of the observed instances in the bottom-up representations and/or unreliable statistics and approximation errors typical of benchmarks in the top-down representations. However, in relational analysis, the quality of the representation does not depend only on the reliability of the individual data used as inputs. Several other factors guarantee the robustness of the representation:

1. The simultaneous use of a bottom-up and top-down approach in any one grammar results in a series of reciprocal relations. Indeed, in a notional representation based on *unitary* processors the characteristics of the processors of the functional and structural elements affect each other in an impredicative way. This impredicativity generates redundancy in the representation. For example, returning to Fig. S5, we can calculate the characteristics of blocks from the information about the observed characteristics of the lower-level structural elements (the oil fields). This is the bottom-up approach. However, we can also use data from available statistics referring directly to the higher level of analysis (e.g., the blocks) (top-down approach). A combination of these two approaches has been used to triangulate the quantitative assessment across the different sources of information (bottom-up versus top-down). This triangulation creates redundancy and mutual information (this has been referred to as “sudoku effect” (Giampietro and Bukkens, 2015), which has not only been used to fill in missing data (see section 3 of this supplement), but also to double-check the quality of the available data input.

2. The simultaneous use of different grammars (i.e., non-equivalent functional aggregations) creates a network of expected relations that amplifies the ‘sudoku effect’ and limits the uncertainty/error propagation. In fact, by using several different logics of aggregation at the same time, i.e., “ad hoc” grammars tailored to different research questions, we establish different types of expected relations between the identities of the processors of the structural and functional elements defined at different levels of analysis. Examples of non-equivalent logics of aggregation that have been used in the current study are illustrated in Fig. S6 and S7. As shown, we have used data referring to metabolic processors assessed at the level of different prospects and blocks (geographic areas) to check the metabolic processors (functional unit) used for the extraction of different types of oil, and data referring to metabolic processors associated with the extraction of different types of oils to define the metabolic processors of an area.

3. The robustness of the representation of a series of reciprocal relations can be further checked using different external referents. We can check whether the data provided by the statistics (top-down approach) are consistent with expected benchmarks at lower levels using expert advice or check whether the characterization obtained from calculating benchmarks (bottom-up approach) is consistent with the big picture from aggregate assessments of similar situations (reference flows). In addition, it is possible to

use conventional methods of sensitivity analysis to any of the relational networks chosen for the representation (Saltelli et al., 2008).

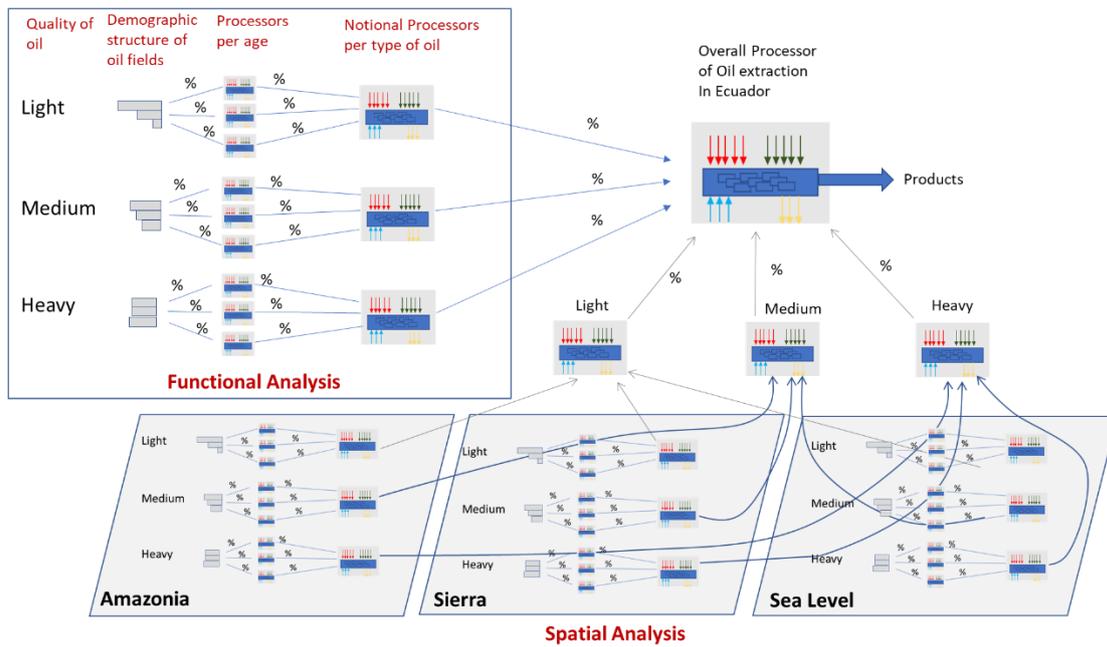


Fig. S6 Examples of the use of different logics of aggregation in an analysis based on metabolic processors generating non-equivalent results and redundancy in the information space.

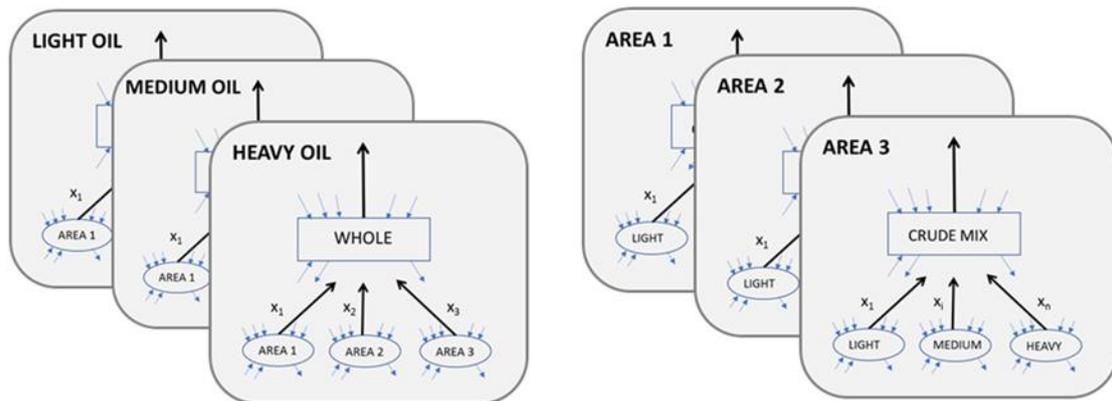


Figure S7: Examples of different logics of scaling of processors in the case study on Ecuador generating non-equivalent representations.

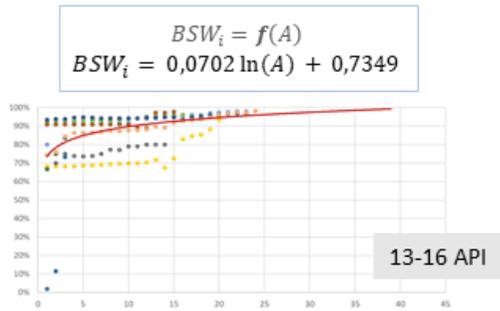
3. Computational structures for filling data gaps: generating unitary processors

This section supplements Figura 3-7 of the main text and explains the procedure (algorithm) used to obtain benchmarks for the unitary processors of the oil fields and define typologies of relations among the unitary processors of functional and structural elements. The benchmarks have been used to fill the data gaps. The different steps of the procedure are described below:

Step 1. First, the oil fields were classified and divided by the API quality of the oil extracted as described in the main text (6 API categories). Hence, the database was divided into subsets for each API category, each subset containing the historic series of all the fields belonging to a given API category. However, given that the fields producing light oil of 33-36 API cover less than 1% of the national production (all located in prospect 1) they were not considered for further study. Hence, the subsequent steps were performed for each of five API categories.

Step 2. For each of the data sub-sets representing a given API quality, we calculated the unitary processors of the individual oil fields (structural elements) based on the information (extensive values) on the various inputs and outputs, the oil supply and BSW. Oil field age was defined in reference to 2018. Ageing was assessed at yearly intervals in correspondence to the yearly historic series available (period from 1972 to 2018). Age span covered for each field depends on the year the field came into production.

Step 3: We then studied the relation between the % BSW in the extracted oil and ageing for all the fields belonging to a given API category. This is illustrated in detail for API quality 21-24 in Figure S8. The relations of BSW as a function of age for each API quality are reported in Figure 4 of the main text and in Figure S9.



Expected BSW
for given age



$$El_i, Fu_i, PC_i, HA_i, W1_i, W2_i, GHG_i: f(BSW_i)$$

$$0 \leq BSW_i \leq 1$$

$$El_i = 2,9 BSW_i + 210$$

$$Fu_i(\text{Elec}) = 0,0345 BSW_i + 2,4968$$

$$Fu_i(\text{Mec}) = 8E-05 BSW_i + 0,2612$$

$$PC_i = 0,0008 BSW_i + 0,0575$$

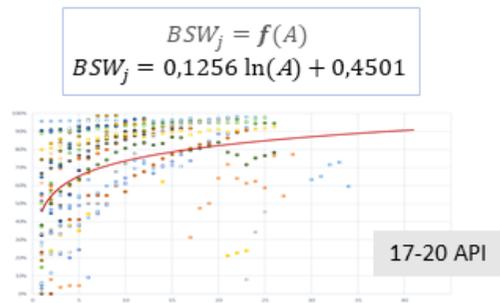
$$HA_i = 0,0108 BSW_i + 3,0141$$

$$= 0,0018 BSW_i^2 - 0,0875 BSW_i + 0,7485$$

$$W1_i = 0,7485$$

$$W2_i = 0,0008 BSW_i + 0,2195$$

$$GHG_i = 7E-5 BSW_i^2 - 0,0023 BSW_i + 0,0265$$



Expected BSW
for given age



$$El_j, Fu_j, PC_j, HA_j, W1_j, W2_j, GHG_j: f(BSW_j)$$

$$0 \leq BSW_j \leq 1$$

$$El_j = 0,863 BSW_j + 89,471$$

$$Fu_j(\text{Elec}) = 0,0101 BSW_j + 1,052$$

$$Fu_j(\text{Mec}) = 7E-05 BSW_j + 0,2152$$

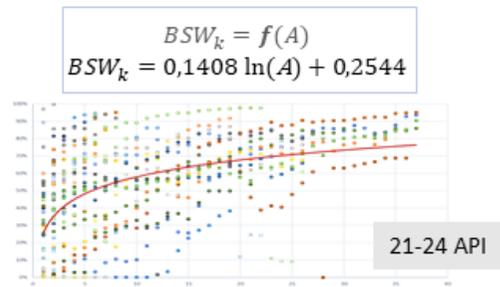
$$PC_j = 0,0002 BSW_j + 0,0245$$

$$HA_j = 0,0097 BSW_j + 2,7068$$

$$W1_j = 0,0018 BSW_j^2 - 0,0875 BSW_j + 0,7485$$

$$W2_j = 0,0007 BSW_j + 0,1829$$

$$GHG_j = 2E-5 BSW_j^2 + 0,0017 BSW_j - 0,0155$$



Expected BSW
for given age



$$El_k, Fu_k, PC_k, HA_k, W1_k, W2_k, GHG_k: f(BSW_k)$$

$$0 \leq BSW_k \leq 1$$

$$El_k = 0,9 BSW_k + 54$$

$$Fu_k(\text{Elec}) = 0,0112 BSW_k + 0,67$$

$$Fu_k(\text{Mec}) = 5E-05 BSW_k + 0,1652$$

$$PC_k = 0,0002 BSW_k + 0,0148$$

$$HA_k = 0,0078 BSW_k + 2,1874$$

$$W1_k = 0,0018 BSW_k^2 - 0,0875 BSW_k + 0,7485$$

$$W2_k = 0,0005 BSW_k + 0,1463$$

$$GHG_k = 3E-5 BSW_k^2 - 0,0004 BSW_k + 0,0119$$

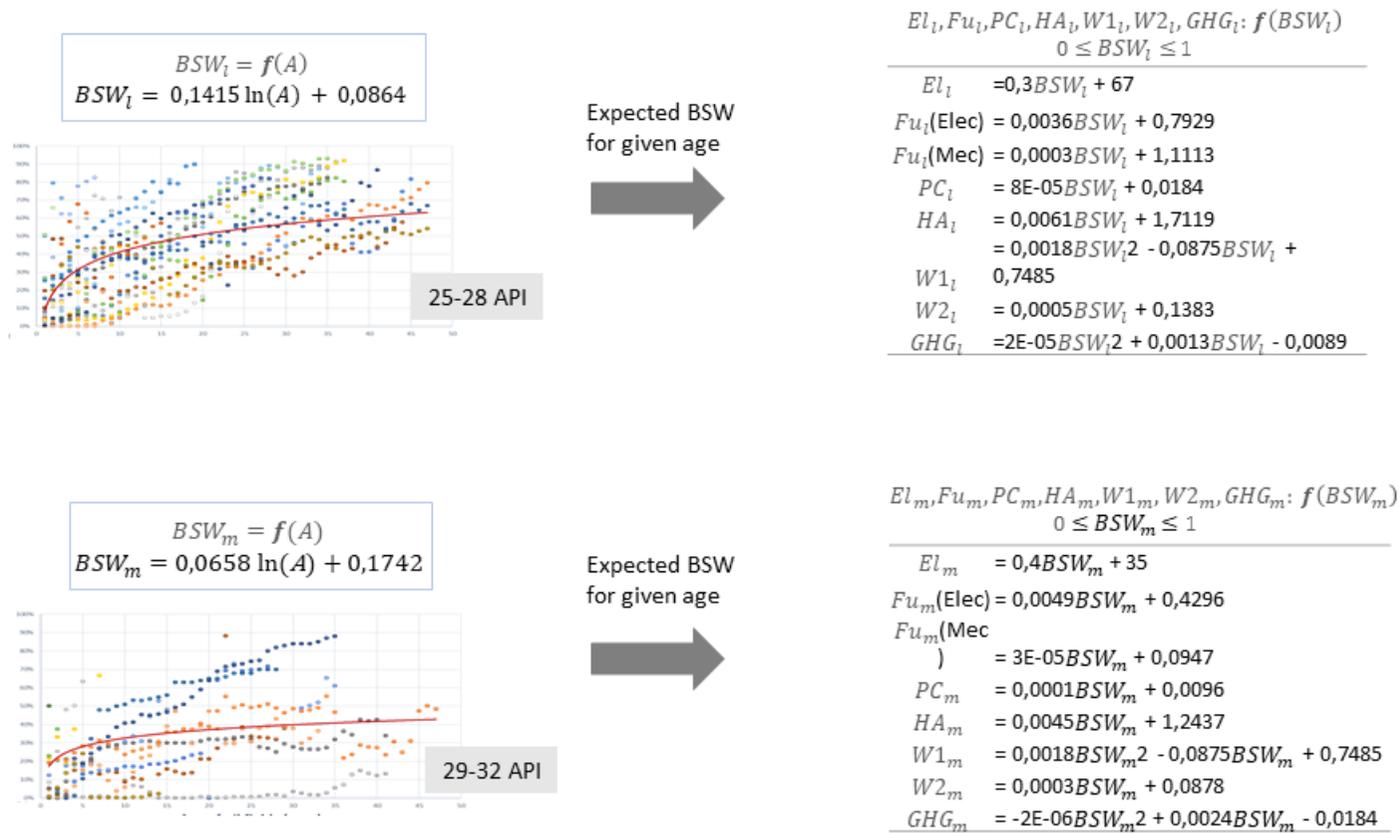


Figure S9: The computational structure for calculating expected values of the unitary metabolic processors of oil fields with ageing using expected BSW (expressed as fraction) for given age and oil quality as data input. Expected BSW is defined by the BSW versus age curve for given API quality.

These relations (curves) give the expected (notional) BSW value for oil fields of a given age and of given API quality and describe the expected change in characteristics of the individual inputs and outputs of the unitary processors with ageing for a given API quality. In the upper right corner of Fig. S8, the observed ranges of variation for the individual inputs and outputs of the unitary processors of fields of an arbitrarily selected age (21 years) and API oil quality (21-24) are also shown.

Step 4. The missing values for the unitary processors of oil fields of a given age and belonging to a given API typology were obtained using the expected BSW value from the curve (as a fraction) as input data in the relations shown on the right hand side of Figure S9. In semantic terms, these relations predict how much the aging of the field has changed the individual inputs and outputs of the unitary processors on the basis of the increase of the volume of crude oil extracted per unit of net oil supplied as measured by the expected BSW value for age and API quality.

Step 5. This procedure can also be used to generate notional representations of functional processors (typologies) of API oil quality based on expected BSW values from the BSW versus age curves.

4. Characteristics of the oil exploitation process by oil prospect, extracted oil quality (API: light, medium, and heavy) and age structure of oil fields for 2018 (Table S1)

The table presented below (Table S1) is supplemental material about ‘Multilevel synchronic view’ of the main text of the paper.

Table S1. Characteristics of the oil exploitation process by oil prospect, extracted oil quality (API: light, medium, and heavy) and age structure of oil fields. Data refer to 2018. Age category refers to the number of years the oil field has been in production.

Oil prospect	Quality (API)	Age (y)	Oil supply (10 ⁶ m ³)	% of total	BSW (%)	Electricity (GWH)	Fuel (Elec.) (PJ)	Fuel (Mec.) (PJ)	Power capacity (MW)	Labor (10 ⁶ h)	Produced water (10 ⁶ m ³)	Water input (10 ⁶ m ³)	GHG (10 ⁴ t)
1	Light oil	10–15	0.06	100%	18%		0.02	0.01	0.55	0.07	0.01	0.00	0.32
1	Total light oil		0.06	96%	18%	2.01	0.02	0.01	0.55	0.07	0.01	0.00	0.32
1	Medium oil	26–30	0.00	100%	72%	0.14	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	0.05
1	Total Medium		0.00	4%	72%	0.14	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	0.05
Total prospect 1			0.06	0.2%	23%	2.16	0.03	0.01	0.59	0.07	0.02	0.00	0.36
2	Medium oil	31–35	0.10	85%	94.3%	6.60	0.08	0.01	1.81	0.16	1.59	0.01	2.31
2	Medium oil	11–15	0.02	14%	2.4%	0.57	0.01	0.00	0.16	0.02	0.00	0.00	0.07
2	Medium oil	5–10	0.00	0.5%	0.0%	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
2	Total Medium		0.11	100%	93.4%	7.21	0.09	0.01	1.98	0.18	1.59	0.01	2.39

Oil prospect	Quality (API)	Age (y)	Oil supply (10 ⁶ m ³)	% of total	BSW (%)	Electricity (GWH)	Fuel (Elec.) (PJ)	Fuel (Mec.) (PJ)	Power capacity (MW)	Labor (10 ⁶ h)	Produced water (10 ⁶ m ³)	Water input (10 ⁶ m ³)	GHG (10 ⁴ t)
Total prospect 2			0.11	0.4%	93.4%	7.21	0.09	0.01	1.98	0.18	1.59	0.01	2.39
3	Medium oil	46–50	0.22	9%	48%	12.06	0.15	0.02	3.30	0.32	0.21	0.02	3.83
3	Medium oil	26–30	0.25	10%	62%	17.50	0.21	0.03	4.80	0.45	0.40	0.03	3.83
3	Medium oil	21–25	0.51	20%	74%	61.20	0.76	0.09	16.77	1.41	1.49	0.09	8.62
3	Medium oil	16–20	1.18	46%	91%	143.38	1.76	0.19	39.28	3.18	11.93	0.23	25.81
3	Medium oil	1–5	0.43	17%	27%	32.02	0.38	0.06	8.77	0.80	0.16	0.06	3.89
3	Total Medium		2.59	71%	85%	266.17	3.25	0.38	72.92	6.16	14.19	0.44	45.98
3	Heavy oil	21–25	0.06	5%	1%	5.21	0.06	0.01	1.43	0.16	0.00	0.01	0.55
3	Heavy oil	16–20	0.72	68%	95%	123.57	1.45	0.16	33.85	2.63	13.23	0.18	16.95
3	Heavy oil	11–15	0.28	26%	92%	47.17	0.55	0.06	12.92	1.01	3.13	0.07	6.51
3	Total Heavy oil		1.06	29%	94%	175.95	2.07	0.23	48.21	3.79	16.36	0.26	24.01
Total prospect 3			3.65	12%	12%	442.12	5.32	0.61	121.13	9.95	30.55	0.70	69.98
4	Medium oil	46–50	6.60	50%	70%	570.57	6.75	0.89	156.32	13.89	15.33	1.12	107.46

Oil prospect	Quality (API)	Age (y)	Oil supply (10 ⁶ m ³)	% of total	BSW (%)	Electricity (GWH)	Fuel (Elec.) (PJ)	Fuel (Mec.) (PJ)	Power capacity (MW)	Labor (10 ⁶ h)	Produced water (10 ⁶ m ³)	Water input (10 ⁶ m ³)	GHG (10 ⁴ t)
4	Medium oil	40–45	2.33	18%	67%	200.63	2.37	0.31	54.97	4.89	4.81	0.39	36.20
4	Medium oil	36–40	0.75	6%	87%	65.61	0.79	0.10	17.98	1.60	4.96	0.12	13.16
4	Medium oil	31–35	0.81	6%	75%	76.31	0.94	0.12	20.91	1.85	2.42	0.13	12.64
4	Medium oil	26–30	0.25	2%	78%	29.71	0.37	0.04	8.14	0.68	0.89	0.05	4.45
4	Medium oil	16–20	0.72	5%	54%	73.46	0.91	0.12	20.12	1.87	0.83	0.12	9.57
4	Medium oil	11–15	0.36	3%	76%	43.59	0.54	0.06	11.94	1.00	1.16	0.07	6.21
4	Medium oil	6–10	1.02	8%	55%	83.09	0.99	0.14	22.76	2.14	1.23	0.17	12.87
4	Medium oil	1–5	0.37	3%	68%	28.80	0.35	0.04	7.89	0.70	0.79	0.05	7.12
4	Total Medium		13.23	83%	71%	1171.76	14.02	1.83	321.03	28.61	32.42	2.22	209.68
4	Heavy oil	36–40	0.88	32%	52%	111.68	1.31	0.19	30.60	2.75	0.96	0.19	12.60
4	Heavy oil	31–35	0.20	7%	38%	24.50	0.29	0.04	6.71	0.62	0.12	0.04	2.71
4	Heavy oil	26–30	0.33	12%	81%	50.30	0.59	0.07	13.78	1.12	1.40	0.08	6.72
4	Heavy oil	21–25	0.68	24%	93%	114.31	1.34	0.15	31.32	2.44	8.96	0.17	15.71
4	Heavy oil	11–15	0.06	2%	38%	18.43	0.22	0.02	5.05	0.20	0.04	0.01	1.77

Oil prospect	Quality (API)	Age (y)	Oil supply (10 ⁶ m ³)	% of total	BSW (%)	Electricity (GWH)	Fuel (Elec.) (PJ)	Fuel (Mec.) (PJ)	Power capacity (MW)	Labor (10 ⁶ h)	Produced water (10 ⁶ m ³)	Water input (10 ⁶ m ³)	GHG (10 ⁴ t)
4	Heavy oil	6–10	0.14	5%	88%	23.48	0.28	0.03	6.43	0.51	1.11	0.03	3.19
4	Heavy oil	1–5	0.48	17%	86%	72.63	0.85	0.11	19.90	1.63	2.83	0.11	9.62
4	Total heavy oil		2.77	17%	85%	415.33	4.89	0.61	113.79	9.26	15.42	0.63	52.32
Total prospect 4			15.99	53%	75%	1587.10	18.90	2.44	434.82	37.87	47.84	2.85	261.99
5	Medium oil	36–40	0.77	25%	94%	107.32	1.33	0.13	29.40	2.27	12.05	0.15	17.73
5	Medium oil	31–35	0.90	29%	83%	88.57	1.06	0.13	24.27	2.09	4.38	0.16	18.45
5	Medium oil	26–30	0.47	15%	82%	48.73	0.59	0.07	13.35	1.14	2.08	0.09	9.32
5	Medium oil	21–25	0.23	7%	98%	32.05	0.40	0.04	8.78	0.67	9.09	0.04	5.37
5	Medium oil	16–20	0.01	0%	93%	0.85	0.01	0.00	0.23	0.02	0.08	0.00	0.14
5	Medium oil	11–15	0.14	5%	97%	19.50	0.24	0.02	5.34	0.41	4.12	0.03	3.25
5	Medium oil	6–10	0.53	17%	90%	70.79	0.88	0.09	19.39	1.53	4.65	0.10	11.34
5	Medium oil	1–5	0.01	0%	78%	0.79	0.01	0.00	0.22	0.02	0.02	0.00	0.11
5	Total Medium		3.04	46%	92%	368.60	4.52	0.48	100.99	8.14	36.47	0.58	65.71
5	Heavy oil	21–25	1.13	32%	97%	488.73	5.81	0.29	133.90	4.54	41.16	0.33	50.39

Oil prospect	Quality (API)	Age (y)	Oil supply (10 ⁶ m ³)	% of total	BSW (%)	Electricity (GWH)	Fuel (Elec.) (PJ)	Fuel (Mec.) (PJ)	Power capacity (MW)	Labor (10 ⁶ h)	Produced water (10 ⁶ m ³)	Water input (10 ⁶ m ³)	GHG (10 ⁴ t)
5	Heavy oil	16–20	1.62	46%	92%	276.31	3.25	0.36	75.70	5.86	18.41	0.40	37.97
5	Heavy oil	11–15	0.10	3%	94%	27.66	0.33	0.02	7.58	0.37	1.58	0.03	3.02
5	Heavy oil	6–10	0.03	1%	94%	8.26	0.10	0.01	2.26	0.12	0.53	0.01	0.96
5	Heavy oil	1–5	0.61	18%	91%	102.94	1.21	0.14	28.20	2.21	6.26	0.15	14.19
5	Total heavy oil		3.51	54%	95%	903.89	10.69	0.82	247.64	13.10	67.94	0.91	106.52
Total prospect 5			6.55	22%	22%	1272.49	15.21	1.30	348.63	21.24	104.41	1.48	172.2
6	Heavy oil	1–5	3.53	100%	83%	1586.36	18.86	0.95	434.62	13.80	16.75	1.00	156.3
6	Total heavy oil		3.53	100%	83%	1586.36	18.86	0.95	434.62	13.80	16.75	1.00	156.29
Total prospect 6			3.53	12%	12%	1586.36	18.86	0.95	434.62	13.80	16.75	1.00	156.29
NATIONAL LEVEL			29.90	100%	87%	4897.43	58.41	5.32	1341.76	83.11	201.16	6.05	663.25

5. References

- Georgescu-Roegen, N., 1971. *The Entropy Law and Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge, MA. <https://doi.org/10.2307/2231206>
- Giampietro, M., Bukkens, S.G.F., 2015. Analogy between Sudoku and the multi-scale integrated analysis of societal metabolism. *Ecol. Inform.* 26. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2014.07.007>
- Giampietro, M., Mayumi, K., Sorman, A.H., 2012. *The Metabolic pattern of societies : where economists fall short*. Routledge, London.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., Tarantola, S., 2008. *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.

Anexo 2: Artículo publicado en la revista Science of the Total Environment



Exploration of the environmental implications of ageing conventional oil reserves with relational analysis



Rony Parra^{a,b}, Sandra G.F. Bukkens^a, Mario Giampietro^{a,c,*}

^a Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain

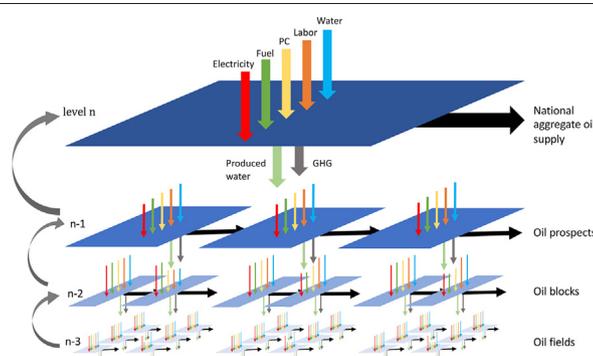
^b Instituto de Investigaciones Hidrocarburíferas, Universidad Central del Ecuador, Quito 170129, Ecuador

^c Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA), 08010 Barcelona, Spain

HIGHLIGHTS

- The versatility of relational analysis to assess oil exploitation is demonstrated.
- Conventional oil extraction in Ecuador in 1972–2018 serves as illustrative case.
- Performance is assessed across hierarchical scales and dimensions of analysis.
- Changes in GHG emission and water flows with ageing of oil fields are highlighted.
- Combined with multi-criteria analysis it can be used for decision support.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 May 2020

Received in revised form 18 August 2020

Accepted 11 September 2020

Available online 16 September 2020

Editor: Kuishuang Feng

Keywords:

Conventional oil
Ageing
Relational analysis
Energy–water nexus
Resource quality
Produced water
Ecuador

ABSTRACT

A novel method based on relational analysis is presented for assessing the performance of conventional oil exploitation and its environmental implications, with a focus on the energy–water nexus. It considers the energy system as a metabolic network and integrates various factors relevant for technical, economic and environmental processes, thus avoiding some of the simplifications inherent in conventional approaches to the assessment of primary resource quality, such as economic cost–benefit analysis (CBA) and the energy return on investment (EROI). Relational analysis distinguishes between functional (notional) and structural (tangible) elements in the metabolic network, which allows a simultaneous characterization and geo-localization of the exploitation process across different scales and dimensions of analysis. Key aspects of the approach are illustrated with data from the Ecuadorian oil sector spanning the period 1972–2018. It is shown that by establishing a relation among the characteristics of the exploited oil fields (oil typology, age of field) and those of the exploitation process (requirement of energy carriers, labor, freshwater and power capacity and generation of greenhouse gases and oil-produced water), changes in the performance and environmental implications of the oil extraction system can be characterized at different points in space and time.

© 2020 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The transition from fossil to renewable energy sources is hot on the political agenda of governments worldwide (European Commission, 2019; United Nations, 2019). The scale and the pace of the transition are key factors in achieving this political ambition (Solé et al., 2018). Indeed, the clean energy transition is not simply a question of substituting

* Corresponding author at: Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain.

E-mail address: mario.giampietro@uab.cat (M. Giampietro).

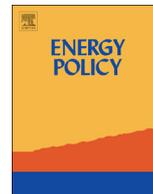
Anexo 3: Artículo publicado en la Revista Energy Policy



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Energy Policy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enpol

The metabolism of oil extraction: A bottom-up approach applied to the case of Ecuador

Rony Parra^{a,b,*}, Louisa Jane Di Felice^b, Mario Giampietro^{b,c}, Jesus Ramos-Martin^a

^a Grupo de Población y Ambiente, Universidad Regional Amazónica Ikiam, Vía Muyuna-Atacapi, Km.7, Tena 150102, Ecuador

^b Institute of Environmental Science and Technology, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain

^c ICREA, Pg. Lluís Companys 23, 08010 Barcelona, Spain

ARTICLE INFO

JEL codes:

Q02
Q35
Q41
Q57

Keywords:

Oil extraction
MuSIASEM
Ecuador
Metabolism
Complexity

ABSTRACT

The global energy system is highly dependent on fossil fuels, which covered approximately 90% of primary energy sources in 2016. As the quality and quantity of oil extracted changes, in response to changes in end uses and in response to biophysical limitations, it is important to understand the metabolism of oil extraction – i.e. the relation between the inputs used and the output extracted. We formalize a methodology to describe oil extraction based on the distinction between functional and structural elements, using the Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM) to generate a diagnostic of the performance of oil extraction and to build scenarios. The analysis allows generating modular benchmarks which are applicable to other countries. It is shown that oil extraction in Ecuador consumes, per cubic meter of crude oil extracted, over 100 kWh of electricity and 1.5 GJ of fuels, requiring 3 kW of power capacity and 2 h of human activity. A scenario is developed to check the effects on Ecuador's metabolic pattern of an increase in oil production over the next five years. The strength of the proposed methodology is highlighted, focusing on the adaptability of the method for dealing with policy issues.

1. Introduction

Despite efforts to reduce greenhouse gas (GHG) emissions and to shift towards a renewable energy system, oil remains an essential part of the global energy chain, with 3820 Mtoe consumed in 2015, out of a total final energy consumption of 9383 Mtoe (International Energy Agency, 2017). This is partly due to the fact that most renewable systems propose an alternative to electricity, rather than fuels. With sustainability issues tied to biofuels, particularly due to concerns over land use in relation to food security (Rathmann et al., 2010), as well as their low energetic output (Rajagopal et al., 2007), it is unlikely that conventional fuels will be phased out in the near future. Given the huge role that oil plays in societies, it is important to understand its metabolism – intended here as the interaction of internal factors determining the relation between the profile of inputs and outputs - particularly in relation to the internal consumption of energy carriers and other flows and funds (see Section 3.1 for a definition), such as water, chemicals, power capacity and human activity.

Most existing studies on the metabolism of the oil extraction sector account for one input of interest, as shown in Section 2. However,

holistic assessments taking into consideration more than one fund or flow at a time, and at different levels, are lacking. Through the use of a Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM), one of the aims of this paper is to fill this methodological gap. We propose an alternative approach to formalize the grammar associated with the oil extraction process in Ecuador, following previous studies found in the literature for the oil and gas sector in Brazil (Aragão and Giampietro, 2016), the gas sector in Mexico (González-López and Giampietro, 2018) and for the electricity metabolism of Catalonia (Di Felice et al., this issue).

The aim of the paper is two-fold: on one hand, to develop methodological tools allowing us to describe the oil extraction process by accounting for various flows and funds across different levels; on the other, to apply the methodology to the case of Ecuador, both characterizing the factors determining the current metabolism and developing a scenario for future extraction and policy.

Section 2 provides background information as well as a review of existing literature. Section 3 outlines the rationale behind MuSIASEM and its proposed energy grammar, focusing on the distinction between functional and structural elements as applied to the oil extraction

* Corresponding author.

E-mail addresses: rony.parra@ikiam.edu.ec (R. Parra), louisajane.difelice@uab.cat (L.J. Di Felice), mario.giampietro@uab.cat (M. Giampietro), jesus.ramos@ikiam.edu.ec (J. Ramos-Martin).

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.017>

Received 18 January 2018; Received in revised form 2 June 2018; Accepted 10 July 2018

0301-4215/ © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Anexo 4: Hoja de vida

Rony Mauricio Parra Jácome
-INGENIERO DE PETRÓLEOS
-MSC EN ESTUDIOS SOCIOAMBIENTALES Y
GOBERNANZA ENERGÉTICA
-CANDIDATO A DOCTOR EN ESTUDIOS Y TÉCNICAS
AMBIENTALES

DIRECCIÓN: El Telégrafo y El Tiempo / Quito-Ecuador
TELÉFONO: 593 2 2443126 - 0998261150
PARRARONY@GMAIL.COM

DATOS PERSONALES

CÉDULA DE IDENTIDAD: 1803737350
NACIONALIDAD: Ecuatoriana
FECHA DE NACIMIENTO: 01 de enero de 1984

FORMACIÓN ACADÉMICA

DOCTORADO EN CIENCIAS Y TÉCNICAS AMBIENTALES

Grupo de investigación: ICTA

Universidad: Universidad Autónoma de Barcelona

Trabajo de investigación: Biophysical constraints of fossil energy systems
Studying the metabolism of Ecuador's oil extraction
Methodologies and application

MAESTRIA EN ESTUDIOS SOCIOAMBIENTALES CON MENCIÓN EN GOBERNANZA ENERGÉTICA

Universidad: Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales FLACSO 2010-2012

Senescyt: 1026-13-86040919

Tesis: Estado actual de la política del sector petrolero ecuatoriano: basado en el análisis de cambio de política, en el período 1992-2012

INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

Universidad: Universidad Central del Ecuador –FIGEMPA

Senescyt: 1005-10-997506

Tesis: Optimización de la operación en el transporte de derivados de petróleo-evaluación y análisis hidráulico del poliducto Quito-Ambato operado por Petroecuador.

DELEGACIONES

- Director del Instituto de Investigaciones Hidrocarburíferas de la Universidad Central del Ecuador
- Decano del Centro de Prospectiva Estratégica CEPROEC (S)
Periodo: Desde el 01 de enero - 20 de enero de 2015
- Participación en el grupo de supervisión de la negociación de los campos maduros de EP Petroecuador (Cuyabeno, Shushufindi, Auca y Libertador).
Periodo: Desde diciembre del 2010- diciembre de 2011
- Participación en el programa de Intercambio de Conocimientos - Knowledge Sharing Programa (KSP) entre Ecuador y Korea, como contraparte técnica en el área petroquímica y manejo de empresas público-privado. Proceso realizado en Korea del Sur.
Período: Desde el 15 de octubre hasta el 31 de diciembre de 2013
- Miembro del comité técnico para la elaboración del Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 028:2011, para el mejoramiento de la calidad de los combustibles comercializados en el Ecuador (gasolinas y diesel).
Periodo: 2010-2011
- Representación en la comisión de SENPLADES en el intercambio bilateral Ecuador-Chile sobre la aplicación de gobierno corporativo para empresas del Estado. Proceso realizado en Chile.
Período: Desde el 24 de febrero al 02 de marzo de 2013.
- Representación de SENPLADES para la participación en el proceso de negociación internacional para la adquisición de GLP para cubrir la demanda nacional en los años 2014-2018. Proceso efectuado en Houston –EEUU.

Periodo: Desde el 16 de enero al 19 de enero de 2013.

EXPERIENCIA PROFESIONAL

Universidad Central del Ecuador

Área: Instituto de Investigaciones Hidrocarburíferas

Cargo: Director

Periodo: septiembre 2019 – actualidad

Actividad: Coordinar la operación del Instituto de Investigaciones Hidrocarburíferas de la Universidad Central del Ecuador

Universidad Central del Ecuador

Área: FIGEMPA

Cargo: Profesor

Periodo: abril, 2019 – actualidad

Actividad: Profesor en la materia de energía, gas natural y gerencia de hidrocarburos

Universidad Regional Amazónica IKIAM

Área: Rectorado

Cargo: Asesor

Periodo: agosto 2017 – diciembre 2018

Actividad: Coordinar acciones sobre la gestión del campus universitario y asesorar a las autoridades sobre la gestión de la empresa pública IKIAM EP.

Universidad Regional Amazónica IKIAM

Área: Carrera de Geociencias

Cargo: Profesor

Periodo: septiembre 2018 – diciembre 2018

Actividad: Profesor de la cátedra de Geología de Hidrocarburos

Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos MICSE

Área: Coordinación de Hidrocarburos

Cargo: Coordinador de Hidrocarburos

Periodo: octubre 2015 – junio 2017

Actividad: Coordinar acciones y asesorar a las autoridades sobre las diferentes iniciativas, proyectos y gestión que se realizan en el sector hidrocarburífero.

Centro de Prospectiva Estratégica CEPROEC

Área: Prospectiva energética

Cargo: Investigador de Ambiente y Energía

Periodo: septiembre 2014 – octubre 2015

Actividad: Coordinar el análisis de investigaciones en energía a partir de la disponibilidad de recursos y el comportamiento de las sociedades.

Universidad Central del Ecuador – Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental FIGEMPA.

Área: Escuela de Petróleos

Cargo: Profesor de la carrera de Ingeniería de Petróleos.

Período: abril 2014 – abril 2015

Cátedras: Gerencia Empresarial Petrolera: Noveno semestre

Gestión Ambiental: Octavo semestre

Métodos de investigación: Sexto semestre

Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo SENPLADES – Coordinación General de Empresas Públicas.

Área: Dirección de Representación en Directorios y Empresas Públicas

Cargo: Especialista de hidrocarburos

Período: julio 2010 – agosto 2014

Actividad: Coordinar el análisis de programas, proyectos y de procesos de gestión de las empresas públicas de los sectores estratégicos Petróleos, Minería, Telecomunicaciones, Electricidad y Ambiental.

EP PETROECUADOR, Terminal de Productos Limpios el Beaterio

Área: Transporte de Hidrocarburos

Cargo: Tesis de investigación

Período: mayo 2009 - febrero 2010

Actividad: Elaboración del Tema de Tesis de Grado: “Optimización de la operación en el transporte de derivados de petróleo-evaluación y análisis hidráulico del poliducto Quito-Ambato operado por Petroecuador”.

INVESTIGACIONES Y PUBLICACIONES

PONENCIAS

Restricciones biofísicas en el sistema de extracción petrolera para el caso del Ecuador

Conferencia: Seminario Internacional de Innovación y Retos Tecnológicos del Sector

Energético en la 4ta Revolución Industrial, 2019

Lugar: Quito/Ecuador

Participación: Expositor

Metabolismo energético en el sistema de extracción petrolera en Ecuador

Conferencia: IV International congress of science, technology and environmental engineering (IV ICSTEE 2019)

Lugar: Riobamba/Ecuador

Participación: Expositor

Análisis del sistema de extracción de petróleo a partir del uso de la tasa de retorno energética (tre) para el caso del Ecuador

Conferencia: XV Congreso de la Sociedad Internacional de Economía Ecológica 2018

Lugar: México

Participación: Expositor

Energy consumption in the oil extraction system of Ecuador

Conferencia: Biennial International Workshop Advances in Energy Studies 2015

Lugar: Suecia -Estocolmo

Participación: Expositor

Energy independence in the Galapagos Islands

Conferencia: Biennial International Workshop Advances in Energy Studies 2015

Lugar: Suecia -Estocolmo

Participación: Expositor

Cambios de la política petrolera en el Ecuador

Seminarios: Red AMAWTA

Lugar: IAEN Ecuador

Participación: Expositor

Características del sistema energético de Galápagos

Seminarios: Red AMAWTA

Lugar: IAEN Ecuador

Participación: Expositor

ARTÍCULOS ACADÉMICOS

Exploration of the environmental implications of ageing conventional oil reserves with relational analysis.

Revista: Science of the Total Environment

Estado: Publicado

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142371>

Autores: Parra, R., Bukkens, S., Giampietro, M

Análisis del sistema de extracción de petróleo a partir del uso de la tasa de retorno energético TRE, para el caso del Ecuador

Book: Ecological Economics and Social-Ecological Movements. Science, policy and challenges to global processes in a troubled world

ISBN: 978-607-28-1611-4

Puebla/México, 2019

The metabolism of oil extraction: a bottom-up approach applied to the case of Ecuador

Revista: Energy Policy

Estado: Publicado

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.017>

Autores: Parra, R., Di Felice, L. J., Giampietro, M., Ramos-Martin, J

Evaluation of energy metabolism in the oil extraction in Ecuador from the application of Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism (MuSIASEM)

Artículo: Universidad de Nápoles

ISBN (e-book): 978-3-85125-395-5

Autores: PhD ©. Rony Parra y PhD. Mario Giampietro

Artículo: Una mirada al largo plazo: Análisis multidimensional de la actividad petrolera en el Ecuador

Revista: Universidad de Sao Paulo / Cadernos Prolam/USP 15 (28): pp.57-77 [2016]

DOI: 10.11606/issn.1676-6288.prolam.2016.120127

Autores: PhD. Javier Martinez, PhD ©. Rony Parra y PhD. Marcos Reis

Libro: Energy and urban systems

Editorial: Verlag der Technischen Universität Graz/Suecia-Estocolmo

ISBN (e-book): 978-3-85125-395-5

Participación: Autor de dos artículos

- Energy independence in the Galapagos Islands
- Energy consumption in the oil extraction system of Ecuador

Libro: Empresas Públicas Ecuatorianas. Perspectivas y reflexiones de su gestión en un contexto sudamericano

Editorial: SENPLADES

ISBN: 978-9942-07-503-1

Participación: Autor del capítulo “El gobierno corporativo como instrumento de fortalecimiento empresarial”

Libro: Empresas Públicas y Planificación: Su rol en la transformación social y productiva

Editorial: SENPLADES

ISBN: 978-9942-07-503-1

Participación: Coautor del libro que fue publicado en el año 2013, por SENPLADES.

Libro: La iniciativa Yasuní ITT desde una perspectiva multicriterial

Editorial: PNUD y FAO

ISBN: 978-9978-9939-9-6

Participación: Asistente Técnico del Proyecto, para la elaboración del libro, 2011

WORKING PAPERS

Análisis de la reestructuración institucional del sector petrolero ecuatoriano en el período 2007-2012

CEPROEC

Fecha de publicación: 08-01-2015

[http://ceproec.iaen.edu.ec/download/wps\(2\)/2015_02.pdf](http://ceproec.iaen.edu.ec/download/wps(2)/2015_02.pdf)

Potencial de la gramática del MuSIASEM en la representación del análisis de la sostenibilidad.

CEPROEC

Fecha de publicación: 15-11-2014

[http://ceproec.iaen.edu.ec/download/wps\(2\)/2015_01.pdf](http://ceproec.iaen.edu.ec/download/wps(2)/2015_01.pdf)

Diagnóstico y análisis biofísico para evaluación y formulación de escenarios de desarrollo en el Archipiélago de Galápagos.

CEPROEC

Fecha de publicación: 15-10-2014

http://ceproec.iaen.edu.ec/download/trs/IT2014_01.pdf

Optimización de la operación del poliducto Quito –Ambato (EP Petroecuador).

REALAC: Red de Centros de Documentación en Energía de América Latina y del Caribe

EP Petroecuador

Año de publicación: 2011

<http://www.olade.org/realc/documento.php?doc=26737>