

EVALUACIÓN EXERGÉTICA DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO JAMAPA EN EL ESTADO DE VERACRUZ

Sheila Vázquez Rosas¹, M. en I. Anilú Miranda Medina²,
Dr. Luis Alberto Peralta Palaez³ y M. en C. Georgina Luna Carrillo⁴

Resumen—En los sistemas ecológicos operan de las interacciones entre elementos bióticos y abióticos incluyendo flujos de masas y de energía. La exergía se fundamenta en la segunda Ley de la termodinámica y se emplea para evaluar el impacto causado sobre los recursos naturales, por lo que es el componente de la energía que puede desarrollar la máxima capacidad de trabajo. Se realizaron monitoreo en la cuenca baja del río Jamapa en el estado de Veracruz. Se identificaron las mayores afectaciones al sistema hídrico y su aporte exergético. El análisis exergético por concentración de componentes dio como resultado que los fosfatos aportan casi el 100% de exergía en las muestras analizadas; debido a que su exergía estándar es de 861 kJ/mol y en comparación del nitrato es 7 veces mayor la cual es de 122 kJ/mol y el amonio es casi 3 veces mayor la cual es de 327 kJ/mol.

Introducción

La calidad del agua es una medida de las propiedades químicas y biológicas de los sistemas acuáticos, en las que se requiere de ciertas características específicas de dichos parámetros en un equilibrio para que pueda vivir la flora y fauna; esto depende tanto de factores naturales como de la acción humana (INECC, 2014; ONU, 2014). Hay diferentes formas de evaluar la calidad del agua en este trabajo, se determinó el grado de contaminación de la cuenca baja del Río Jamapa por medio de la exergía química.

La exergía química es el trabajo útil o la energía que es liberada por los elementos o compuestos presentes en un cuerpo de agua, debido a la alteración del recurso hídrico por la contaminación o alteración por diversos factores, humanos o naturales; que por lo general es ocasionado por industria, agricultura y poblaciones cercanas a los cuerpos de agua (Valero, *et al.*, 2010).

El análisis de la cuenca del Río Jamapa por medio de la exergía es con el fin de realizar una evaluación de la calidad del agua; el río será estudiado debido a que es utilizado como agua potable y para las actividades agrícolas por los municipios que pasa como Medellín, Jamapa y Boca del Río. Al realizar la evaluación se obtendrá un valor expresado en kW/km, se determinará el grado de contaminación de la cuenca baja del Río Jamapa y para qué tipo de actividad es apta; el análisis se hará usando los datos obtenidos por Licona (2015), determinando cuántos y cuáles parámetros se requieren para calcular la exergía química. La contaminación de la cuenca baja del río Jamapa analizada por Licona (2015), fue un análisis cualitativo y cuantitativo, utilizando como herramienta de análisis el Índice de Calidad el Agua (IAC).

Descripción del Método

Hay diferentes formas de evaluar la calidad del agua, desde análisis físicos, químicos, biológicos e hidromorfológicos; los análisis dependen de que tanto se requiere conocer sobre la calidad del agua. Por lo regular los análisis son fisicoquímicos y biológicos, con esto se puede tener una idea en general de la contaminación que existe en los cuerpos de agua.

La metodología utilizada en este proyecto consistió en 6 fases; la primera de las fases fue la recopilación de la información, en donde se documentó el estudio de la exergía, la calidad del agua y el área de estudio. La fase dos es el análisis de la información para la estructuración del proyecto. En la fase tres se definieron los parámetros involucrados en la exergía química, después en la fase 4 se evaluó, estableció y determino si los parámetros obtenidos fueron necesarios para calcular la exergía; se definió la ecuación de la exergía química. El paso 5 fue calcular la exergía química del río para valorar la afectación de la cuenca baja del río Jamapa. Por último, la fase 6 se elaboró el diagrama de perfil de la exergía química de la cuenca.

¹ Sheila Vázquez Rosas, egresada de Ingeniería Química en el Instituto Tecnológico de Veracruz, México. Sheila.v.rosas@gmail.com (autor corresponsal)

² M. en I. Anilú Miranda Medina, Profesora del Departamento de Ingeniería Química e Ingeniería Bioquímica en el Instituto Tecnológico de Veracruz, México. amime_77@hotmail.com

³ Dr. Luis Alberto Peralta Palaez, Profesora del Departamento de Ingeniería Química e Ingeniería Bioquímica en el Instituto Tecnológico de Veracruz, México. luisalberto.peraltapalaez@gmail.com

⁴ M. en C. Georgina Luna Carrillo, Profesora de Ingeniería Química y Ingeniería Bioquímica en el Instituto Tecnológico de Veracruz, México. georginaluna25@hotmail.com

1) *Índice de calidad del agua*

El índice de calidad del agua (ICA) es un indicador que nos permite conocer el grado de contaminación del agua, mediante unos valores que oscilan entre el 0 al 100, estos valores son comparados en una tabla en donde tiene rangos que determinan la calidad del agua (Tabla 1).

Tabla I: rango de clasificación del índice de calidad de agua

Rango	Criterio general	Color indicador
91-100	Excelente	
71-90	Aceptable	
51-70	Poco contaminado	
26-50	Contaminado	
0-25	Altamente contaminado	

Fuente: citado por Licona, 2015

El ICA empleado en México establecido por la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es una modificación. Los parámetros establecidos por la SEMARNAT son 18, seleccionados por su importancia relativa para reconocer el grado de contaminación (Citado por Licona 2015). La Comisión Nacional del Agua propone calcular el índice de calidad del agua mediante la ecuación 1, donde n es el número total de parámetros; I_i el índice de cada parámetro; W_i el coeficiente de ponderación del parámetro i .

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{Ec. 1}$$

La evaluación de la calidad del agua está conformada por 18 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos agrupados en cuatro categorías (Tabla 2) los cuales fueron establecidos por la SEMARNAT.

Tabla 2. Parámetros establecidos para determinar el ICA por CONAGUA

Parámetro	Peso (W_i)	Parámetro	Peso (W_i)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	5	Nitrógeno en nitratos (NO_3^{-1})	2
Oxígeno disuelto	5	Alcalinidad	1
Coliformes fecales	4	Color	1
Coliformes totales	3	Dureza total	1
Sustancias activas de azul de metilo (detergentes)	3	Potencial de hidrógeno (pH)	1
Conductividad eléctrica	2	Sólidos suspendidos	1
Fosfatos totales (PO_4^{-3})	2	Cloruros (Cl^{-1})	0.5
Grasas y aceites	2	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno amoniacal (NH_3)	2	Turbiedad	0.5

Fuente: Tomado de (Sánchez, *et al.*, 2007)

2) *Localización del área de estudio*

La cuenca del río Jamapa- Cotaxtla se encuentra localizada en el centro del estado de Veracruz, dicha cuenca inicia desde los límites del estado de Puebla y Veracruz, en la zona del Pico de Orizaba; se encuentra ubicada entre la cuenca del río la Antigua y la cuenca del río Papaloapan. Dicha cuenca es alimentada dos corrientes, una de ellas es el colector principal y la segunda es el colector de afluente, es decir, que lleva sus aguas a un río mayor, estas corrientes se llaman Cotaxtla y Jamapa respectivamente (INE, 1991). La delimitación del parteaguas de la unidad hidrológica de interés se llevó a cabo por medio del uso de las cartas topográficas escala 1:50000 editadas por el INEGI. Por medio de la digitalización de las curvas de nivel, hidrografía e infraestructura, se obtuvo el plano

específico de la cuenca. Las cartas utilizadas son las siguientes: E14-B47, Huatusco – Veracruz; E14B48, Soledad del Doblado; E14B49, Veracruz-Veracruz; E14B59, Piedras Negras; E14B58, Cotaxtla; E14B57, Córdoba y E14B46, Coscomatepec de Bravo Pue-Ver (Santamaría, 2011) (Figura 1).

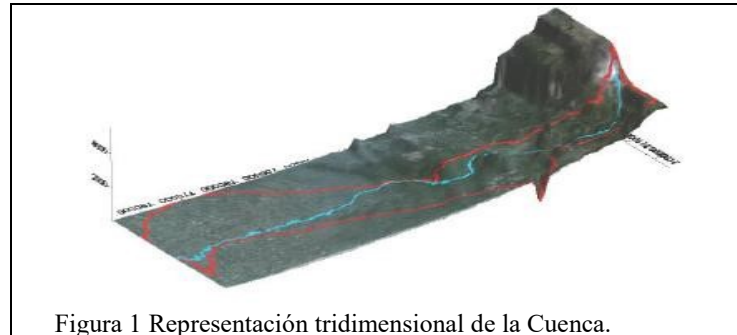


Figura 1 Representación tridimensional de la Cuenca.

3) Componentes de la exergía

La exergía absoluta es medida en Watts (W) y tiene componentes generales, éstos constituyentes son la exergía cinética, potencial, física y química; estas no son las únicas componentes ya que también se pueden incluir la exergía térmica, nuclear, mecánica. La ecuación general de la exergía excluyendo la exergía térmica, nuclear y mecánica es la siguiente:

$$\beta = \beta c + \beta p + \beta f + \beta q \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

β = Exergía

βc = Exergía cinética

βp = Exergía potencial

βf = Exergía física

βq = Exergía química

La exergía cinética es igual a la energía cinética que es la energía que posee un cuerpo debido a su movimiento. “Se define como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de masa determinada desde el reposo hasta una velocidad determinada”. (Bahrami, 2011). La exergía cinética es descartada en el análisis debido a que los puntos de monitoreo no se encuentra en ninguna zona de rápidos o en el corazón de una cascada.

La exergía potencial es también una forma de energía mecánica; el potencial para realizar un trabajo se deriva de la posición o configuración del cuerpo. En este caso la exergía potencial depende de la altura de un objeto sobre cierto punto de referencia. Para considerar la exergía potencial el análisis por lo general es efectuado en los nacimientos de ríos; en los embalses con instalaciones para la generación de energía hidroeléctrica. La altura es cero cuando el punto de referencia se encuentra al nivel del mar ($z_0 = 0$).

La exergía física es el trabajo que se puede obtener sometiendo una sustancia a procesos físicos reversibles desde la temperatura (T) y presión (P) iniciales, hasta el estado determinado por la presión y la temperatura de entorno; esto es el máximo trabajo útil obtenido al pasar la unidad de masa de una sustancia del estado genérico (T, P) y la del medio ambiente (T_0, P_0) del estado a través de procesos puramente físicos.

$$\beta f = [h(T, P) - h(T_0, P)] - T_0[s(T, P) - s(T_0, P)] \quad \text{Ec.3}$$

Tomando el balance de la Ec. 2 la exergía cinética, exergía potencial y la exergía física se eliminan de la ecuación y se obtiene la Ec. 4 para determinar la exergía por medio de la exergía química.

$$\beta = \cancel{\beta c} + \cancel{\beta p} + \cancel{\beta f} + \beta q \quad \text{Ec. 2}$$

Por lo tanto

$$\beta = \beta q \quad \text{Ec.4}$$

La exergía química es el trabajo útil o la energía que es liberada por los elementos o compuestos presentes en un cuerpo de agua, debido a la alteración del recurso hídrico por la contaminación o alteración por diversos factores, humanos o naturales; que por lo general es ocasionado por industria, agricultura y poblaciones cercanas a los cuerpos de agua (Valero, *et al.*, 2010). La exergía química está conformada por la exergía química de formación y la de concentración. La exergía química puede ser calculada mediante la ecuación 3.

$$\beta q = Q \left[\sum_i y_i \left(\Delta G_{fi} + \sum_e n_e b_{q,ne} \right) + RT_0 \sum x_i \ln \frac{a_i}{a_{0i}} \right] \quad \text{Ec.5}$$

Donde:

- ΔG_f = Energía de formación de Gibbs (kJ/mol)
- n_e = Cantidad de kmol del elemento e
- $b_{q,ne}$ = Exergía química estándar del elemento o compuesto (kJ/mol)
- a_i = Coeficiente de actividad de la sustancia en el agua
- x_i = Fracción molar
- T_0 = Temperatura (K)
- Q = Caudal (l/s)
- R = Constante de los gases (J/mol K)

Para calcular el coeficiente de actividad de la sustancia en el agua se utiliza la Ecuación 6.

$$a_i = r_i x m_i \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

- a_i = Coeficiente de actividad de la sustancia en el agua
- r_i = Fugacidad
- m_i = Molalidad

La exergía química estándar del elemento, es la cantidad de energía que se requiere para formar una molécula del elemento a estudiar. Existe un apéndice de exergía química estándar para diferentes elementos y compuestos orgánicos e inorgánicos, en donde las condiciones tienen un valor de temperatura de 298.15 K y una presión de 101.325 kPa (Sato, 2004; Bastidas Alzate, 2014).

V. RESULTADOS

A. Puntos de Muestreo

Los resultados obtenidos por Licona (2015) fueron en el período Agosto 2013- Julio 2014, en el cual se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 3, a partir de los cuales se realizó el estudio exergético (ec. 3) de los fosfatos, nitratos y amonio y de la DBO (se analizaron los parámetros antes mencionados, ya que se cuenta con la exergía estándar, variable que es requerida para el análisis).

B. Análisis de la exergía del período Agosto 2013- Julio 2014 en cada punto de muestreo:

1) Punto de muestreo Jampa

Las exergías obtenidas en el período de Agosto 2013- Julio 2014 oscilan entre 45.32 kJ/mol para el mes de abril de 2014 y 1,071.86 kJ/mol para el mes de septiembre del 2014 (Gráfica 1).

2) Punto de muestreo Zapotal

La exergía va en aumento en cada punto de muestreo, en el Zapotal la exergía mayor fue en el mes de septiembre del 2013 la cual es de 1355.34 kJ/mol y el mes de julio del 2014 es de 43.33 (Gráfica 2).

3) Punto de muestreo Ixcoalco

En Ixcoalco la exergía tuvo una disminución de casi la mitad en comparación del Zapotal, el valor es de 785.33 kJ/mol en el mes de junio y el mínimo es de 137.48 kJ/mol, cabe mencionar que este punto en comparación a los anteriores la exergía no bajo a menos de 100 kJ/mol (Gráfica 3).

4) Punto de muestreo Planta Potabilizadora "El Tejar"

Las muestras en este punto fueron tomadas antes de entrar el agua en la planta potabilizadora, el mes con la exergía mas alta es mayo con un valor de 650.24 kJ/mol y 91.36 kJ/mol en el mes de abril. La exergía aumento drásticamente en menos de un mes ya que la muestra de abril fue tomada el 22 de abril y para el 17 de mayo la exergía aumento alrededor de 7 veces en menos de un mes (Gráfica 4).

TABLA 3. PARÁMETROS ANALIZADOS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO JAMAPA

Parámetro	Unidades	Sitio de muestreo				
		Jamapa	Zapotal	Ixcoalco	Planta Potabilizadora "El Tejar"	Medellín
pH		7.55	5.77	7.54	7.55	7.45
Temperatura	°C	25.96	25.66	25.61	25.76	25.9
Turbidez	UTN	74.83	28.13	14.61	66.08	41.71
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	5.75	5.77	4.50	5.19	5.20
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mgO ₂ /L	51.91	52.79	51.96	51.09	50.74
Fósforo	mg/L	27.89	29.14	33.34	32.17	34.48
Amonio	mg/L	0.04	0.07	0.04	0.06	0.09
Nitratos	mg/L	2.18	2.29	2.20	2.49	2.41
Sólidos Suspendidos totales	mg/L	0.03	0.02	0.007	0.03	0.2
3.Coliformes fecales	NMP/100 mL	4133.61	5325.60	4566.07	10033.01	7970.62

Fuente: Tomado de (Liconsa, 2015)

GRÁFICA 1. PUNTO DE MUESTREO JAMAPA



GRÁFICA 2. PUNTO DE MUESTREO ZAPOTAL



GRÁFICA 3. PUNTO DE MUESTREO IXCOALCO



GRÁFICA 4. PUNTO DE MUESTREO POTABILIZADORA "EL TEJAR"



C. Análisis de exergía por concentración promedio:

1) Exergía por concentración de fosfatos

A partir de los datos observamos que los fosfatos aportan casi el 100% de exergía en las muestras analizadas; debido a que su exergía estándar es de 861 kJ/mol y en comparación del nitrato es 7 veces mayor la cual es de 122 kJ/mol y el amonio es casi 3 veces mayor la cual es de 327 kJ/mol. La exergía que aporta el fosfato tomadas en cada punto de muestreo es casi el 100% (Gráfica 5).

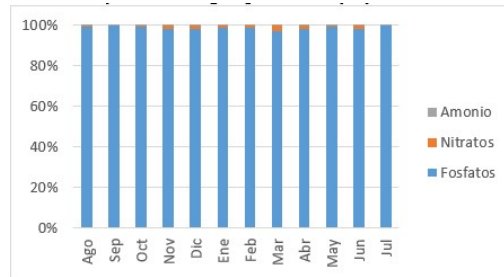
2) Exergía por concentración de nitratos

Como se observa en la Gráfica 6, los valores no varían significativamente como en el caso de los fosfatos, estos valores fluctúan alrededor de 2.1 a 2.4 kJ/mol, siendo el valor más alto la muestra tomado en la planta potabilizadora "El Tejar".

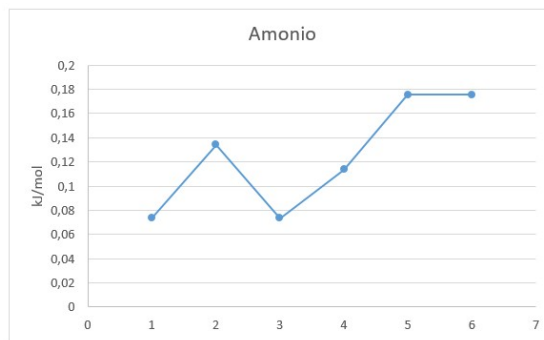
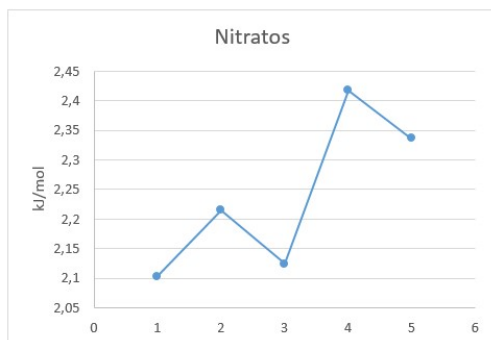
3) Exergía por concentración de Amonio

Los valores obtenidos del amonio, son muy bajos por lo que se dice que carece de contaminación el agua del río Jamapa. Los resultados obtenidos de la exergía son entre 0.07 y 0.17 kJ/mol (Gráfica 7).

GRÁFICA 5. EXERGÍA POR CONCENTRACIÓN DE FOSFATOS



GRÁFICA 6. EXERGÍA POR CONCENTRACIÓN NITRATOS GRÁFICA 7. EXERGÍA POR CONCENTRACIÓN DE AMONIO



Conclusiones

La exergía es una valiosa herramienta para la evaluación integral de los recursos naturales, en esta investigación se evaluó el recurso hídrico encontrando importantes ventajas con la aplicación de esta técnica, en comparación con un análisis individual de valores máximos permitidos para el uso del agua en cada parámetro, puesto que se analiza el río como un sistema en el cual ocurre un complejo proceso de mezcla, encontrando satisfactorios resultados, en cuanto al estado del río y su capacidad para recibir una determinada concentración de un parámetro. El análisis de la exergía química de una corriente de agua permite analizar el río a lo largo de su recorrido y realizar comparaciones que permitan definir los tramos más afectados orientando la gestión de los recursos hídricos de manera rigurosa. Los resultados demuestran que la mayor cantidad de exergía aportada al sistema biológico (Cuenca baja del Río Jamapa) fue por parámetro de fosfatos, en todos los puntos muestreados. Que se sustenta y avala los resultados de Licona (2015) a la calidad de agua.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al estudiante de IBQ Ricardo de Jesús Sevilla Cruz por su valiosa contribución en esta investigación en 2015.

VI. REFERENCIAS

- Bahrami, M., 2011. *Exergy*. Vancouver : s.n.
- Bastidas Alzate, M. L., 2014. *Evaluación exergética de la calidad del agua de tres ríos en Colombia*. s.l.:s.n.
- Bastidas Alzate, M. L., 2014. *Evaluación exéctica de la calidad del agua de tres ríos en Colombia*. Palmira: s.n.
- Cengel, Y. & Bones, M., 1989. *Termodinámica*. s.l.:s.n.
- Chen, G. Q. & Ji, X., 2007. Chemical exergy based evaluation of water quality. *Ecological Modelling*, 200(1-2), pp. 259-268.
- CONAGUA, 2009. *SEMARNAT*. [En línea] Available at: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/compendio_2000/03dim_ambiental/03_02_Agua/data_agua/RecuadroIII.2.2.2.htm [Último acceso: 23 09 2015].
- Ebro, C. H. d., 2009. *Confederación Hidrográfica del Ebro*. [En línea] Available at: <http://www.chebro.es/contenido.visualizar.do?idContenido=27697&idMenu=4030> [Último acceso: 02 10 2015].
- INE, 1991. *Anexo al Diagnóstico de la Problemática de la Contaminación del Agua en el Estado de Veracruz*. 1 ed. Veracruz : Banderilla .
- INECC, 2014. *Instituto Nacional de Ecología y Camio Climático*. [En línea] Available at: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/612/calidad.pdf> [Último acceso: 01 10 2015].
- Lezcano, D., 2010. *Estudio exergético para identificar y evaluar potencialidades en energías renovables en el territorio colombiano, para planeamiento energético en periodos futuros*. s.l.:s.n.
- Licona, L. L. A., 2015. *Desarrollo y Aplicación de un Índice de Calidad de Agua para la Cuenca baja del río Jamapa, en el Estado de Veracruz*. Veracruz: Tesis.

- ONU, 2014. *Naciones Unidas*. [En línea] Available at: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml> [Último acceso: 02 10 2015].
- Osma, G. & Ordoñez, G., 2010. Desarrollo sostenible en edificaciones. *Revista de la facultad de ingenierías físicas y mecánicas*.
- Ramírez, A., Restrepo, R. & Viña, G., 1997. Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación. *Ciencia Tecnología y Futuro*, 1(3).
- Reolon, L., 2010. *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*. [En línea] Available at: <http://www.pnuma.org/agua-miaac/codia%20calidad%20de%20las%20aguas/material%20adicional/ponencias/ponentes/tema%203%20grh%20uruguay%20a%20guarani/indicadores%20de%20calidad%20del%20agua%20superficial.pdf> [Último acceso: 02 10 2015].
- Rodríguez, M. M. C., 2004. Exergía: Una oportunidad para el desarrollo tecnológico. *Cintex*, 1(10), pp. 28-30.
- Sánchez, Ó. y otros, 2007. Calidad del Habitat. En: R. P. Munguía, ed. *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. México: Casa de Libro, pp. 76,77,78,79.
- Santamaría Garnica, L. M., 2011. *Modelación hidrológica en la cuenca del Río Jamapa, Veracruz*. s.l.:s.n.
- Sato, N., 2004. Exergy in Mixing Substances. En: *Chemical Energy and Exergy*. Hokkaido: ELSEVIER, pp. 105,16,107,108.
- SEMARNAT, 2005. *Dirección General de Estadística e Información Ambiental*. [En línea] Available at: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/07_agua/cap7_2.html [Último acceso: 02 10 2015].
- SEMARNAT, 2010. *Compendio de Estadísticas Ambientales 2010*. [En línea] Available at: http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html [Último acceso: 02 10 2015].
- Szargut, J., Morris, D. & Steward, F., 1986. *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*. s.l.:s.n.
- Torres, P., Héman, C. C. & Janeth, P. P., 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), p. 14.
- Valero, A. & Botero, E., 2003. *La sostenibilidad ambiental a escala planetaria, el coste físico de reposición del capital mineral de la Tierra*. s.l.:s.n.
- Valero, A., Uche, J. & Martínez, A., 2010. *The hidden value of water flows: the chemical exergy of rivers*. Zaragoza: Artículo.
- Veracruz, S. d. P. C. d. E. d., 2015. *Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz*. [En línea] Available at: <http://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/atlas-municipales/> [Último acceso: 10 09 2015].
- Zamudio, I., 2015. *Milenio*. [En línea] Available at: http://www.milenio.com/estados/contaminacion-contaminacion_de_rio_jamapa-peces_muertos_en_rio_de_veracruz_0_445155698.html [Último acceso: 11 09 2015].