

Pronóstico de contaminación en residuales líquidos, mediante funciones de respuesta

Contamination Forecast in Liquid Residues by Response Functions

MSc. Elizabeth Canchingre–Bone^I, elizabeth.canchingre@gmail.com; Dr.Cs. Ramón Rodríguez–Betancourt^{II}, rr828845@gmail.com; Dra.C. Milagros Morales–Pérez^{III}, milagros@uo.edu.cu

^IUniversidad “Luis Vargas Torres” de Esmeraldas, Ecuador; ^{II}Profesor invitado de la Universidad “Luis Vargas Torres” de Esmeraldas, Ecuador; ^{III}Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

Resumen

En el objetivo 11 del Plan Nacional del Buen Vivir (2013-2017), el estado considera un sector estratégico el agua, recurso natural renovable. Sin embargo, las industrias han excluido del proceso productivo la planificación racional de la contaminación de los Residuales Líquido. El nivel de eficiencia de lo planificado en estos residuales en la Refinería de Esmeraldas es insuficiente, pues no se conoce desde el punto de vista fabril cuál es el factor que más incide en la contaminación, con vista a poner énfasis en su disminución, lo cual conlleva a la utilización de técnicas econométricas para lograr este objetivo. Para su cumplimiento se utiliza un modelo de Regresión Lineal Múltiple, a partir de cinco funciones a escoger la mejor. Los resultados han permitido a la Refinería Estatal de Esmeraldas crear las premisas necesarias para la ejecución del plan de inversiones 2018–2020 con el mínimo costo y plazo de recuperación.

Palabras clave: residuales líquidos, Regresión Lineal Múltiple, contaminación, plan de inversiones, eficiencia.

Abstract

In objective 11 of the National Plan for Good Living (2013-2017), the state considers water as a strategic sector, a renewable natural resource; however, industries have excluded from the productive process the rational planning of pollution of Residuals Liquids. The level of efficiency of the planned in these residues in the Esmeraldas Refinery is insufficient, since it is not known from the factory point of view what is the factor that most affects the contamination, with the aim of emphasizing its decrease, Which leads to the use of econometric techniques to achieve this objective. For its fulfillment a Multiple Linear Regression model is used, from five functions to choose the best one. The results have enabled the Esmeraldas State Refinery to create the necessary premises for the execution of the 2018-2020 investment plan with the minimum cost and recovery period.

Keywords: residual liquids, Multiple Lineal Regression, contamination, plan of investments, efficiency.

Introducción

La comunidad internacional ha reconocido en múltiples eventos el importante papel que desempeña el agua en un sistema sostenible de desarrollo industrial y la necesidad de que las empresas asuman al respecto una conducta socialmente responsable. La Agenda 21, (1992, 208), en el capítulo 30, exige que “el sector empresarial eleve la eficacia de los procesos de producción y se adopten tecnologías y procedimientos limpios, reduciendo al mínimo, e incluso evitando, los residuales líquidos, contribuyendo de esta forma a la conservación del agua”.

El afán de las empresas por maximizar los beneficios en el proceso productivo ha excluido de la gestión empresarial, por lo general, la protección del medio ambiente y específicamente la que se refiere al tratamiento de los residuos líquidos, lo que provoca que la contaminación del agua sea uno de los principales problemas ambientales que afecta al bienestar del ser humano, lo que limita, a su vez, el cumplimiento de los Objetivos del Milenio.

La República del Ecuador no escapa a esta realidad, a pesar de que el Plan Nacional del Buen Vivir (PNBV, 2013, 217) expresa en su objetivo 11 “la necesidad de garantizar los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable, y de reconocer que la responsabilidad de tratar el agua y la biodiversidad como patrimonios estratégicos es un desafío para las políticas públicas del país”.

En los últimos diez años se ha aceptado la importancia de dos conceptos clave, a saber: los ecosistemas no solo poseen su propio valor intrínseco, sino que además proporcionan servicios esenciales al género humano y, en segundo lugar, que la durabilidad de los recursos hídricos requieren una gestión participativa, basada en el ecosistema (GEO-4, 2013). Sin embargo, a pesar de que está legalmente establecida la necesidad de la conservación del medio ambiente, y que esto exige una nueva conducta por parte de las empresas, el gobierno ecuatoriano no ha logrado, en materia de planificación y gestión de los recursos hídricos, el nivel requerido para minimizar el impacto negativo de la actividad empresarial, lo cual garantiza el derecho humano al agua limpia, segura y permanente, sobre todo por el deficiente tratamiento de los Residuales Líquidos (RL), además de que este tratamiento debe realizarse con mayor nivel de eficiencia.

Según la Memoria de Sostenibilidad de la Refinería Estatal de Esmeraldas, REE, (2013, 51), en la refinación de petróleo se emplean 466 m³/h de agua para lavar los materiales

indeseados de la corriente del proceso, relacionados con el enfriamiento y producción de vapor, y con los procesos de refinación de los hidrocarburos. Entre los contaminantes principales que se encuentran en los efluentes de la refinería están: aceites y grasas, compuestos fenólicos, amoníaco, sulfuros, ácidos orgánicos, cromo y otros metales.

La Refinería Estatal de Esmeraldas (REE), para el cumplimiento de las leyes ambientales, lo cual influye en la calidad de vida de la comunidad, destina grandes cantidades de recursos materiales y financieros para el tratamiento de los RL, los cuales afectan los costos de refinación.

Por otra parte, se desconoce el peso de los factores principales que afectan a estos residuales y, por tanto, se emplean cuantiosos recursos en disminuir los factores secundarios que afectan la contaminación, limitando así la calificación de empresa económica, social y ambientalmente responsable.

Se ha constatado que el nivel de eficiencia en la Empresa Pública (EP)-PETROECUADOR agrupa todo lo referente a explotación, refinación y venta del petróleo y sus derivados es insuficiente, específicamente en la Refinería Esmeraldas, por un inadecuado tratamiento de los RL, lo que incide en los incrementos de los gastos de la partida Seguridad y Ambiente, a pesar de que la Gerencia de Seguridad, Salud y Ambiente desde el año 2010 contribuye con actividades de mitigación de las fuentes de contaminación.

Entre las consecuencias de la baja eficiencia en el control de la contaminación en la Refinería de Esmeraldas se destacan:

1. La contaminación del entorno natural local. Específicamente la contaminación del agua en el río Teaone, y su desembocadura en el río Esmeraldas y este en el mar, provocada por la inadecuada tratamiento de los RL del sector empresarial esmeraldeño y en especial de la refinería, teniendo como resultados:
 - Afectaciones a la salud de la población local, en el orden de :
 - a) Enfermedades diarreicas agudas (EDA).
 - b) Parasitosis.
 - c) Enfermedades dermatológicas.

Se realizó, por la Dirección provincial de salud de Esmeraldas, un diagnóstico ambiental social en la ciudad, en el 2014, y mostró que en la zona aledaña a la REE, el 58 % de la

población se ha afectado por EDA y parasitosis y el 37 % por problemas dermatológicos.

- Pérdida de la biodiversidad acuática.
 - Afectación a la pesca como actividad económica (EP-Petroecuador, 2015).
2. Insuficiente capacitación a los trabajadores que a su vez ha repercutido en que la educación ambiental tenga bajos niveles.
 3. El monto de las inversiones ambientales disminuye, y así lo demuestra el hecho de que en 2014 el monto fue de 15 040 miles de USD y en el 2015, 7 786 (Balance anual de la RRE, 60), lo cual indica que EP-PETROECUADOR debe incrementar la eficiencia en el tratamiento de los RL, con el propósito de lograr el cumplimiento de las normas de contaminación con el mínimo costo posible.

A partir de estos elementos el objetivo de la presente investigación es realizar el pronóstico de la contaminación de los Residuales Líquidos en la Refinería Estatal de Esmeraldas, República del Ecuador, mediante técnicas econométricas. La presente investigación forma parte de un proyecto de investigación de las Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Técnica “Luis Vargas Torres” en la provincia de Esmeraldas, República del Ecuador y ha generado un proyecto asociado a los Semilleros de Investigación.

Fundamentación teórica

En muchos trabajos experimentales y de tipo económico se ha propuesto investigar cómo los cambios de una variable afectan a otra. Algunas veces dos variables serán enlazadas por una relación lineal exacta, en todos estos casos, se debe manejar la información necesaria del comportamiento de estas variables, que por lo general es una muestra de la población. A partir de aquí puede utilizarse algunos modelos para obtener una función que relacione estas variables.

Una de las técnicas econométricas más utilizada actualmente es el análisis de regresión. Las ideas básicas de la regresión lineal simple, a partir de la función de regresión poblacional (FP) con una variable independiente, y su extrapolación a la función de regresión muestral (FM). Se parte de una muestra, con la cual, utilizando el método de los mínimos cuadrados se obtienen los coeficientes de regresión. Estas ideas pueden ser extrapoladas al análisis de regresión lineal múltiple. Una línea de regresión lineal múltiple hallada a partir del método de los mínimos cuadrados debe ser sometida a

supuestos, los cuales si no se cumplimentan se debe ampliar o cambiar la muestra seleccionada (Rodríguez, 2009). Los supuestos son los siguientes:

- 1) El modelo debe estar bien especificado, lo cual quiere decir que los coeficientes deben corresponderse con el fenómeno bajo estudio.
- 2) La media de los errores debe ser igual a cero.
- 3) Debe examinarse el coeficiente R^2 , lo cual indica la bondad del ajuste, es decir, la explicación de la variable dependiente por las independientes.
- 4) Prueba F, es una prueba paramétrica sobre los parámetros poblacionales de la población; indica si hay relación entre las variables independientes con la dependiente.
- 5) Prueba t, también es una prueba paramétrica al igual que la F pero para cada coeficiente.
- 6) Independencia y normalidad de los errores: prueba no paramétrica que corresponde al supuesto del que parte el teorema de Gauss–Markus. Su no cumplimiento implica que las pruebas F y t no son confiables.
- 7) Prueba de homoscedasticidad, implica que las varianzas de los errores son constante para cada predicción y su cumplimiento confirma que la muestra hallada pertenece a la población.
- 8) Prueba de multicolinealidad, es decir, las variables independientes no pueden estar correlacionadas. El cumplimiento de esta prueba garantiza que los pronósticos que se realicen sean confiables.
- 9) Los pronósticos deben estar acordes con el recorrido de la variable independiente (Gujarati, 2009).

Cualquier incumplimiento de estos supuestos implica ampliar o cambiar la muestra y comenzar el proceso nuevamente.

Métodos utilizados

En el desarrollo de la investigación se aplicarán los métodos siguientes:

- El método histórico–lógico, para el análisis de la evolución de la economía ambiental y su incidencia en la Refinería Estatal de Esmeraldas.
- El método análisis–síntesis, para la caracterización del objeto y campo de acción de la investigación.

- El método de lo general a lo particular, para analizar los antecedentes del tema desde el ámbito internacional hasta el nacional, con las particularidades en la provincia de Esmeraldas en la República del Ecuador.
- Las Técnicas Econométricas asociadas a los sistemas informáticos profesionales para la formulación, planteamiento y solución del problema bajo estudio

Resultados y discusión

Formulación general del problema a resolver

La Refinería Estatal de Esmeralda utiliza el agua del río Teoane para el enfriamiento de sus plantas, en este proceso el agua se contamina con diferentes sustancias que producen las plantas del proceso de refinación. Es conocido que los contaminantes demandan química de oxígeno, grado de acidez y los aceites y las grasas ocupan hasta el 80 % de contaminación de los RL de la Refinería. Sin embargo, se desconoce el peso de los factores que intervienen en la contaminación (Informe Mensual del Laboratorio Refinería Estatal de Esmeralda, 2015). Existen las condiciones técnicas y organizativas para obtener los datos relevantes del problema del laboratorio de la Refinería Estatal de Esmeralda.

Con estas premisas el problema sería determinar la mejor función de respuesta mediante la cual se pueda estimar el grado de contaminación de los RL, variable dependiente, a partir de los principales factores que lo producen, variables independientes, lo cual permitirá en una primera etapa de la investigación determinar cuál sería el peso de los factores que intervienen en la contaminación, con el objetivo de proyectar el programa de inversiones a costo mínimo.

Las funciones de Respuestas se calcularán mediante la Regresión Lineal múltiple, utilizando el método de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO).

Teniendo en cuenta esta formulación sustentada por la hipótesis se podría plantear el siguiente conjunto de modelos econométricos:

El análisis de regresión lineal tiene cinco pasos metodológicos fundamentales: identificación, información primaria y estimación, verificación, pronóstico y utilización del modelo para fines de control o formulación de políticas.

Planteamiento matemático del problema**a) Identificación**

Para la construcción de las funciones de respuestas, el planteamiento econométrico general del modelo es el siguiente:

Variable dependiente

Y_i - observación i del grado de contaminación en porciento,

Variables independientes:

X_{1i} - observación i de la Acidez (pH) dado iones de hidrógeno con la puntuación del tres al nueve.

X_{2i} - observación i del DQO dados en partes por millón (ppm)

X_{3i} - observación i de los Aceites y Grasas dados en partes por millón (ppm)

Parámetros:

β_0 - Constante de la función y representa el grado de contaminación de los RL, cuando las variables independientes toman el valor de cero;

β_1 - Coeficiente asociado pH, representa la variación promedio del porciento de contaminación por variación unitaria del pH, manteniendo constante el resto de las variables independientes;

β_2 - Coeficiente asociado al DQO dado en ppm, representa la variación promedio del porciento de contaminación por variación unitaria de la DQO, manteniendo constante el resto de las variables independientes;

β_3 - Coeficiente asociado a los aceites y grasas dados en ppm, representa la variación promedio del porciento de contaminación por variación unitaria de los aceites y grasas, manteniendo constante el resto de las variables independientes;

ε – perturbación estocástica, que representa una variable sustitutiva de todas las variables omitidas que puedan afectar a Y_i .

El punto de partida estará dado por cinco funciones de respuesta o modelos de regresión lineal múltiples, los cuales se muestran a continuación:

Lineal: $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$;

Lineal-Logarítmica: $Y = \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \dots + \beta_n \ln X_n + \varepsilon$;

Inversa: $Y = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{X_1}\right) + \beta_2 \left(\frac{1}{X_2}\right) + \dots + \beta_n \left(\frac{1}{X_n}\right) + \varepsilon;$

Doble logarítmica: $\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \dots + \beta_n \ln X_n + \varepsilon;$

Logarítmica-Lineal: $\ln Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon.$

b) Información primaria y estimación de los coeficientes de modelos

En cuanto a la información primaria se utilizará una muestra suficiente grande tomada del laboratorio de la Refinería Estatal de Esmeralda, en cual realiza los análisis correspondientes en sus tres turnos de trabajo diario. La estimación se realiza utilizando el MCO, el cual garantiza que la varianza sea mínima, si se cumplen los supuestos del teorema de Gauss–Markov, Se utiliza el sistema SICEP v.5, elaborado en Borland C++, el cual garantiza la automatización de cada uno de los supuestos del teorema Gauss–Markov. El sistema analiza las funciones de respuestas que le son dadas, y si no se cumplen los supuestos correspondientes, va eliminando de forma inteligente y transversalmente la muestra que produce el mayor error. Si en este proceso no existe función alguna que cumple con todo los supuestos se cambia la muestra, hasta que la solución es encontrada. Si existe más de una función que cumple con los supuestos, se elige la mejor utilizando el coeficiente de determinación R^2 o el error de estimación. Los resultados son validados con el sistema SPSS v.15.

c) Verificación

El propio sistema SICEP v.5 se encarga automáticamente de la verificación de los supuestos rechazando la muestra en caso necesario. El sistema verifica Todos los supuestos relacionados con la Regresión lineal múltiple.

El supuesto sobre si el modelo está bien especificado y la multicolinealidad se realiza una vez obtenido el modelo.

d) Pronóstico

En este paso se otorgan valores a las variables independientes y se comprueba que los pronósticos corresponden con la variación de la variable dependiente.

El cumplimiento de los anteriores supuestos implica que el modelo es aceptado. En caso contrario debe ampliarse o cambiarse la muestra.

Utilización del modelo para fines de control o formulación de políticas.

La evaluación de políticas es la utilización de un modelo econométrico estimado para la toma de decisiones alternativas. Un enfoque puede presentar explícitamente una función objetivo para maximizar, mediante la elección de políticas y considera el modelo estimado como una restricción de este proceso de optimización.

De las funciones analizadas, solo la lineal cumple con todas las verificaciones del proceso inferencial. Los resultados se presentan en la siguiente tabla No 1:

TABLA 1: MODELO SELECCIONADO A PARTIR DEL GRADO DE EXPLICACIÓN DE LAS VARIABLES ACIDEZ, DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO Y ACEITES Y GRASAS A LA CONTAMINACIÓN

MODELO	FUNCIÓN
Lineal	$\hat{Y}_i = 52,33488 - 1,245195 X_1 + 0,017368 X_2 + 0,027421 X_3 + e_i$
Coefficientes β Estandarizado	$\hat{Y}_i = 52,33488 - 0,230324 X_1 + 0,460659 X_2 + 0,315206 X_3 + e_i$

Leyenda: \hat{Y}_i : Grado de contaminación en %; X_1 : pH en escala; X_2 : Demanda Química de Oxígeno en partes por millón y X_3 : Aceite y Grasas, en partes por millón.

Fuente: Sistema Informático para al Cálculo de Estimados de Producción y Servicios (SICEP v.5).

El cálculo de los estimados del grado de contaminación de los RL para combinaciones de los contaminantes que se consideren más significativas, partiendo de la función escogida, está basado en la media de cada una de las variables independientes. Este cálculo se presenta en la siguiente tabla 2.

**TABLA 2: REFINERÍA ESTATAL DE ESMERALDAS
ESTIMADO DEL GRADO DE CONTAMINACIÓN DE LOS RESIDUALES LÍQUIDOS
OCTUBRE-DICIEMBRE DEL 2015**

Estimado del Grado de Contaminación (%)	Contaminantes		
	X ₁ pH dado en la iones hidrógenos	X ₂ DQO (ppm)	X ₃ Aceites y Grasas (ppm)
52,4	6	167	170
55,2	5	447	50
59,3	7	777	80
63,8	4	773	110
63,9	5	473	350
60,8	7	673	200
53,4	8	272	230
58,2	9	572	260
57,3	9	472	290
71,8	4	790	390
67,4	4	650	320
63,8	8	600	400
54,6	6	342	140
71,9	4	780	400

Si se analiza la tabla 2 se observa, que al aumentar los factores la contaminación aumenta hasta alcanzar un máximo de 71,9 los valores pronosticados oscilan llegando a un mínimo de 52,4 %. Además, la combinación de factores para obtener el estimado del grado de contaminación no presenta variaciones significativas, por lo que los coeficientes de regresión son los mejores estimadores lineales insesgados (MELI) y son eficientes.

Conclusiones

1. *Mediante la aplicación de las técnicas econométricas se ha demostrado que puede obtenerse el peso de los factores que intervienen en la contaminación por residuales líquidos empresariales.*
2. *Los coeficientes de regresión están dados en diferentes unidades de medidas. La interpretación de los coeficientes significa en este caso que por cada unidad que aumentan los factores, la contaminación aumenta en el coeficiente de regresión correspondiente dado en %, ya que la variable dependiente está dada en por ciento, manteniendo constante el resto. Este análisis se realiza para cada variable independiente. En este sentido el coeficiente del pH es el que más influye en la contaminación, con un coeficiente negativo de -1,245195 de*

decremento en la contaminación por cada ión de hidrógeno que aumente este contaminante, significando que el aumento de este factor contribuye a la disminución de la contaminación. Le siguen los Aceites y Grasas, cuyo coeficiente es 0,027421, y por último la DQO ppm con 0,017 368.

3. *No obstante debido a las diferentes unidades de medidas en que se expresan las variables independientes, es conveniente conocer la influencia de los factores en la contaminación utilizando el coeficiente β Estandarizado, que es el coeficiente relativo a las unidades de desviación, como se observa en este caso el factor que más influye es la DQO, los Aceites y Grasas, y por último el pH.*
4. *La ecuación hallada puede ser utilizada como restricción en modelos económicos matemáticos de programación lineal conjuntamente con otras restricciones para determinar la combinación óptima de factores que minimicen los costos dedicados a la contaminación.*

Referencias bibliográficas

1. Semplades. (2013). *Plan Nacional del Buen Vivir Ecuador, 2013-2017*. Quito, Ecuador
2. Agenda 21, (1992). Río de Janeiro, Brasil. Disponible en www.pnuma.org.
3. Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente, (2013). GEO-4, Medio Ambiente para el desarrollo, resumen para los tomadores de decisiones. Disponible en www.unep.org.
4. Empresa Pública Petroecuador. (2013). Memoria de Sostenibilidad Refinería Esmeraldas. Disponible en www.eppetroecuador.ec.
5. Informe de la Dirección provincial de salud de Esmeraldas. (2014). Diagnóstico ambiental social de la ciudad.
6. Departamento económico de la Refinería Estatal de Esmeraldas. (2015). Balance anual de la empresa.
7. Empresa Pública Petroecuador. (2014, 2015). Balance Anual de la Empresa de Esmeraldas. Disponible en www.eppetroecuador.ec.
8. Gujarati, D.N., (2009). *Basic Econometrics*. (eighth Edition). McGraw-Hill.
9. Empresa Pública Petroecuador. (2015). *Análisis diario del Laboratorio*. Disponible en www.eppetroecuador.ec.
10. Lavandeira, Xavier; María; Vázquez Xosé León Carmelo J. (2007). *Economía ambiental*. España: Editorial Prentice Hall.
11. Rodríguez, R., Arrieta, M. (2009). *Enfoque Económico en la Economía de la Salud*. La Habana: Instituto Cubano de la Salud.