

Reporte de Simulación: Predicción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la Cuenca Atoyac-Salado, Oaxaca

Daniel Eduardo Garcia Salvador
Ingeniería en Sistemas
Instituto Tecnológico de Oaxaca
Oaxaca, México

Edwin Jovanny Martinez Rodriguez
Ingeniería en Sistemas
Instituto Tecnológico de Oaxaca
Oaxaca, México

Angel Emmanuel Perez Aguilar
Ingeniería en Sistemas
Instituto Tecnológico de Oaxaca
Oaxaca, México

Resumen—El río Atoyac en Oaxaca presenta niveles críticos de contaminación debido a descargas municipales e industriales. Este trabajo analiza datos históricos de la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RNMCA) del periodo 2012-2020, enfocándose en la subcuenca Atoyac-Salado. Se implementa un modelo de simulación basado en regresión lineal múltiple para predecir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) a partir de parámetros correlacionados como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el Oxígeno Disuelto (OD). El modelo resultante permite estimar el deterioro de la calidad del agua y proponer herramientas para la toma de decisiones en la gestión hídrica de los Valles Centrales, alcanzando un coeficiente de determinación (R^2) de 0.69, lo que valida su utilidad como sistema de alerta temprana. Adicionalmente, se integra información comparativa sobre bioindicadores y parámetros fisicoquímicos de otras cuencas oaxaqueñas (Copalita y Los Perros) para contextualizar la problemática estatal.

Index Terms—Contaminación hídrica, Río Atoyac Oaxaca, Simulación, Regresión Lineal, DQO, RNMCA, NOM-001, Bioindicadores, Río Los Perros, Río Copalita.

I. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua limpia es fundamental para el desarrollo sostenible de Oaxaca. Sin embargo, la industrialización y el crecimiento urbano en los Valles Centrales han comprometido severamente los cuerpos de agua. Según el diagnóstico de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el río Atoyac y su afluente, el río Salado, son los más afectados en la entidad [1]. La problemática se agrava debido a la falta de infraestructura de saneamiento eficiente; se estima que gran parte de las aguas residuales generadas en la zona metropolitana de Oaxaca se vierten crudas al cauce. Esto ha generado no solo un desastre ecológico, sino un riesgo latente para la salud pública.

El deterioro de los recursos hídricos no es exclusivo de los Valles Centrales. Estudios recientes en la subcuenca del Río Copalita han demostrado que manantiales destinados al consumo humano presentan contaminación bacteriológica y pérdida de integridad biótica debido a actividades antropogénicas y fenómenos naturales como huracanes [5]. De igual manera, en la región del Istmo, el río Los Perros sufre incrementos drásticos de coliformes fecales y nitrógeno total durante la

época de lluvias, producto de aguas de retorno agrícola y descargas sin tratamiento [6].

El presente trabajo tiene como objetivo adaptar un modelo de simulación predictivo a las condiciones específicas de Oaxaca, utilizando datos reales de estaciones de monitoreo clave como San Antonio de la Cal y la zona industrial. La meta es estimar los niveles de DBO_5 , un parámetro que tradicionalmente requiere 5 días de incubación en laboratorio, pero que mediante este modelo computacional puede ser inferido instantáneamente para agilizar la respuesta de las autoridades.

II. MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO

II-A. Fundamentos Biogeoquímicos e Indicadores

Para comprender la contaminación del río Atoyac y su contexto regional, es necesario definir las variables críticas del estudio y métodos complementarios:

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5):** Representa la cantidad de oxígeno que las bacterias requieren para descomponer la materia orgánica biodegradable en el agua durante 5 días a 20°C. Un valor alto indica contaminación orgánica reciente.
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Mide la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente toda la materia orgánica, sea biodegradable o no. Es crucial en zonas industriales donde hay vertidos químicos que las bacterias no pueden degradar.
- **Oxígeno Disuelto (OD):** Es el oxígeno disponible para la vida acuática. Existe una relación inversa crítica: a mayor carga orgánica (DBO/DQO), menor oxígeno disuelto, provocando la muerte de peces (anoxia).
- **Bioindicadores y Macroinvertebrados:** Además de los parámetros fisicoquímicos, la integridad de un ecosistema puede evaluarse mediante índices bióticos (como el IIBA-MA). En la cuenca del Río Copalita, la presencia de organismos del orden *Diptera* (tolerantes a la contaminación) y la ausencia de los órdenes *Ephemeroptera*, *Plecoptera* y *Trichoptera* (EPT) han servido para categorizar sitios como "pobres" o impactados ambientalmente [5].

- **Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo):** En cuencas agrícolas como la del río Los Perros, el Nitrógeno Total puede elevarse hasta 5.0 mg/L en época de lluvias debido al uso de fertilizantes, lo cual favorece la eutrofización [6].

II-B. Contexto Normativo (NOM-001)

Es importante señalar que los datos históricos (2012-2020) se rigen bajo la **NOM-001-SEMARNAT-1996**. Sin embargo, la entrada en vigor de la nueva **NOM-001-SEMARNAT-2021** ha hecho los límites más estrictos. Mientras que la norma de 1996 permitía hasta 150 mg/L de DBO en ciertos cuerpos receptores, la nueva norma reduce drásticamente estos límites y pone mayor énfasis en la Toxicidad y la DQO verdadera. Este simulador adquiere mayor relevancia en este nuevo contexto, pues permite predecir si una descarga cumplirá o no con los parámetros de DQO/DBO antes de ser vertida, evitando multas costosas para los municipios.

III. METODOLOGÍA

III-A. Recopilación y Limpieza de Datos

Se utilizó la base de datos oficial de la RNMCA. El preprocesamiento incluyó:

1. Filtrado de estaciones correspondientes a la cuenca RH20 (Costa de Oaxaca) y específicamente la subcuenca Atoyac-Salado.
2. Eliminación de valores atípicos (outliers) causados por errores de sensor (ej. pH 14 o 0).
3. Imputación de datos faltantes mediante promedios móviles de 3 periodos para mantener la continuidad de las series de tiempo.

Cabe mencionar que otras metodologías aplicadas en Oaxaca, como en el estudio del Río Los Perros, han utilizado muestreos estacionales (estiaje y lluvias) con sondas multiparámetro in situ y análisis de metales pesados (As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn) por absorción atómica [6]. Por otro lado, en la subcuenca Copalita se emplearon redes tipo D-net para la recolección de macroinvertebrados acuáticos para calcular el Índice de Integridad Biótica (IIBAMA) [5]. Aunque nuestro estudio se centra en la simulación numérica de la DBO_5 , estas metodologías complementarias resaltan la complejidad del monitoreo ambiental.

III-B. Modelo de Regresión Lineal Múltiple

Se seleccionó un modelo de regresión lineal múltiple (MLR) por su eficiencia computacional y capacidad explicativa. El modelo busca ajustar una ecuación de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \epsilon \quad (1)$$

Donde Y es la variable dependiente (DBO_5), y X_n son las variables independientes (DQO, OD, SST). Los coeficientes β se estimaron utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS), minimizando la suma de los errores cuadráticos entre el valor real y el predicho.

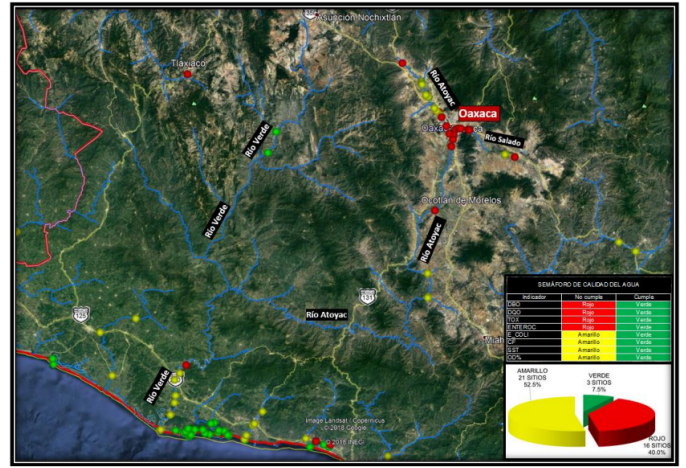


Figura 1. Ubicación geográfica de los puntos de monitoreo en la cuenca Atoyac-Salado, Oaxaca. Las zonas rojas cerca de Oaxaca de Juárez indican alta densidad de descargas.

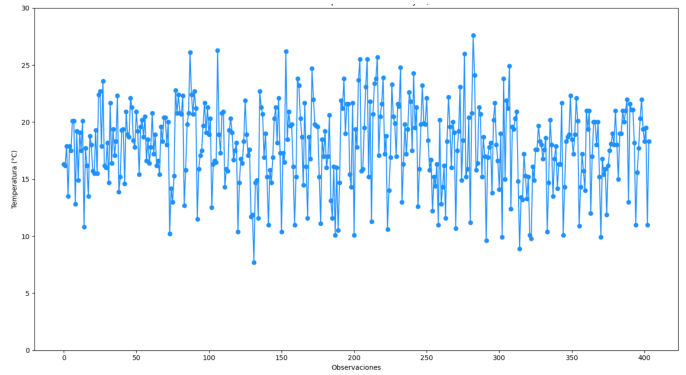


Figura 2. Variación histórica de la Temperatura del agua en los puntos de monitoreo. Nótese la estabilidad térmica promedio, con picos estacionales.

IV. DATOS DE LA CUENCA ATOYAC-OAXACA

El estudio se fundamenta en un análisis histórico de la calidad del agua en la cuenca, procesando una base de datos depurada que comprende el periodo **2012-2020**. El conjunto de datos consta de **404 registros** validados.

El análisis estadístico revela una variabilidad extrema. En temporada de estiaje, la concentración de contaminantes aumenta drásticamente debido a la reducción del caudal del río, lo que impide la dilución natural de los vertidos. Esta tendencia estacional también se ha observado en el río Los Perros, donde las concentraciones de grasas y aceites alcanzaron entre 54 y 90 mg/L durante el estiaje, reduciéndose a 5 mg/L en lluvias por efecto de dilución [6].

Como se observa en la Fig. 3, existen periodos donde el Oxígeno Disuelto cae a niveles cercanos a cero, coincidiendo con los picos de contaminación orgánica representados por la DQO y los Sólidos Suspendidos (Figs. 4 y 5). Esta correlación visual respalda la hipótesis del modelo: la carga orgánica (DQO) consume el oxígeno disponible.

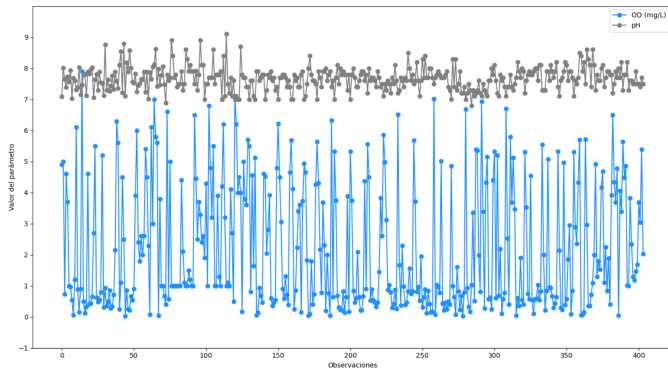


Figura 3. Comportamiento histórico del Oxígeno Disuelto (OD) y el pH. Se observan caídas de OD cercanas a 0 mg/L en 2013 y 2017, indicando condiciones anaerobias críticas.

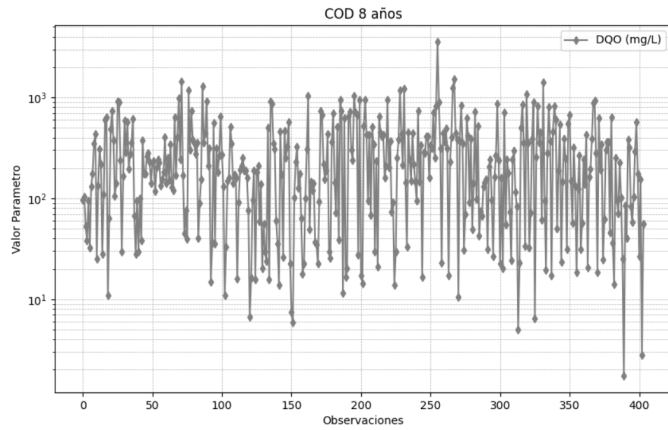


Figura 4. Histórico de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Picos superiores a 300 mg/L sugieren descargas industriales intermitentes.

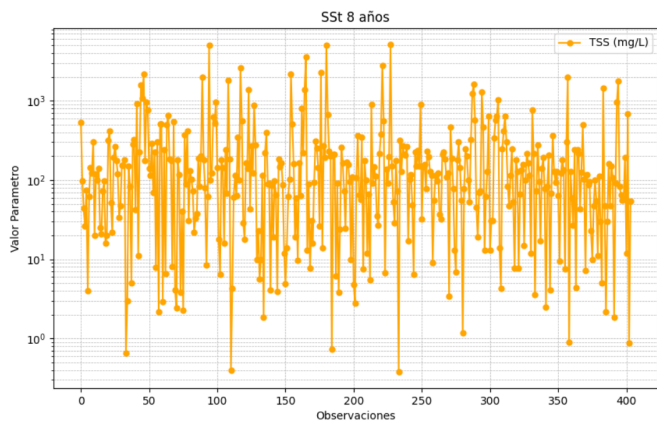


Figura 5. Concentración de Sólidos Suspended Totales (SST) a lo largo del tiempo. Los SST altos incrementan la turbidez y afectan la fotosíntesis acuática.

V. DESARROLLO DEL MODELO Y VALIDACIÓN

V-A. Ecuación Predictiva Final

Tras realizar el entrenamiento del algoritmo con el 80 % de los datos y validar con el 20 % restante, se obtuvo el modelo



Figura 6. Gráfico de errores residuales. La dispersión uniforme valida que no existen sesgos sistemáticos en la predicción.

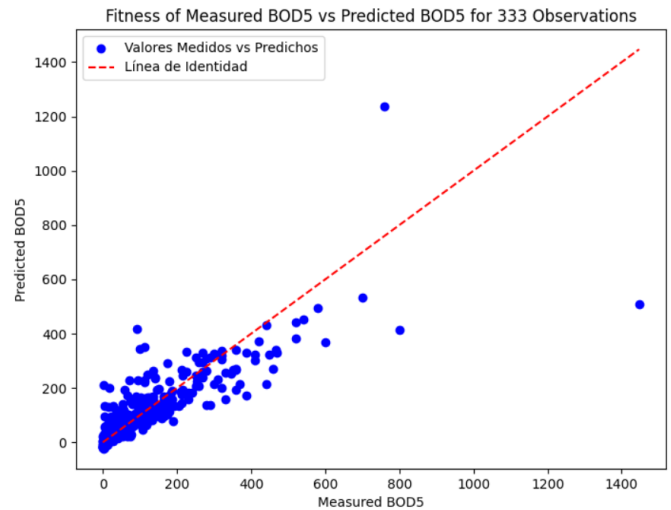


Figura 7. Correlación lineal entre valores reales (eje X) y predichos (eje Y). La cercanía a la diagonal demuestra la precisión del modelo ($R^2 = 0,69$).

matemático optimizado para Oaxaca:

$$BDO5_{est} = 0,3382(DQO) - 7,5993(OD) + 24,7147 \quad (2)$$

Esta ecuación tiene una interpretación física clara:

- El factor **0.3382** asociado a la DQO indica que aproximadamente un tercio de la carga química es biodegradable en el corto plazo.
- El factor negativo **-7.5993** asociado al OD actúa como un factor de corrección: si hay mucho oxígeno, es probable que la contaminación orgánica sea baja, reduciendo la estimación de DBO.

V-B. Análisis de Residuales

Para verificar la fiabilidad del modelo, se analizaron los errores residuales (diferencia entre valor real y predicho). La Fig. 6 muestra que los errores se distribuyen de manera aleatoria en torno a cero, lo cual es indicativo de un buen modelo estadístico (homocedasticidad).

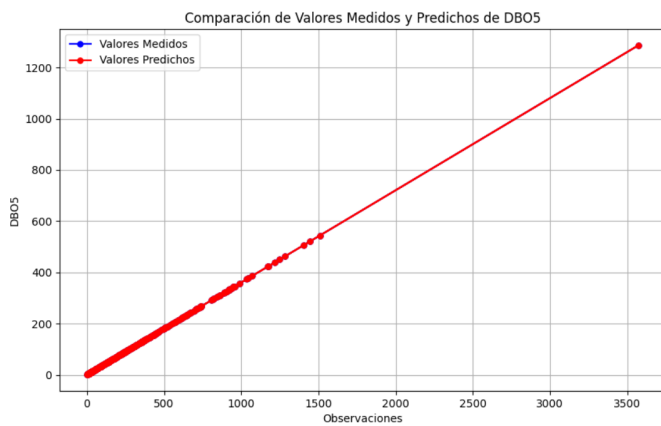


Figura 8. Proyección a corto plazo de la DQO. Se prevé una tendencia estable pero alta para la próxima semana.

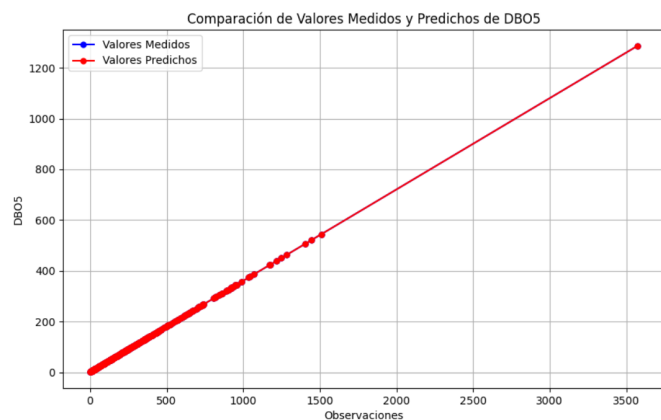


Figura 9. Proyección a corto plazo del OD. Los niveles bajos pronosticados alertan sobre posible estrés hídrico.

VI. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y ANÁLISIS REGIONAL

El sistema de simulación utiliza series de tiempo para proyectar primero las variables independientes (DQO y OD) a 6 días futuros, como se muestra a continuación.

Finalmente, la integración de estas variables arroja la predicción de la DBO_5 :

Los resultados muestran que los niveles de DBO_5 se mantendrán oscilando entre 50 y 80 mg/L en los días proyectados. Aunque estos valores podrían cumplir marginalmente con la norma antigua en algunos casos, bajo la NOM-001-2021 representarían un incumplimiento, señalando la urgencia de tratamiento terciario en las plantas municipales.

VI-A. Comparativa Regional

Al contrastar los resultados simulados del Atoyac con datos empíricos de otras cuencas de Oaxaca, se evidencia la disparidad en la calidad del agua:

- **Río Los Perros:** En la parte alta de esta cuenca, se reportaron valores de DBO_5 entre 0.3 y 1.0 mg/L, clasificándose como agua de "excelente calidad" para este

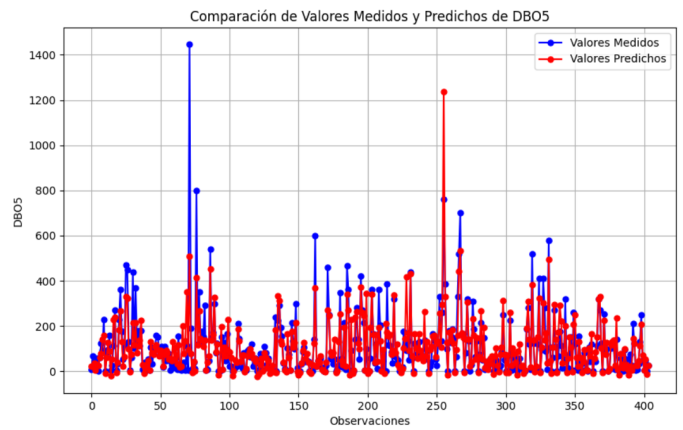


Figura 10. Simulación final: Comparativa entre valores medidos y la predicción a 6 días de DBO_5 (línea roja).

parámetro específico, aunque con alta contaminación bacteriológica en lluvias ($>1,000$ NMP/100 mL de coliformes fecales) [6].

- **Río Copalita:** En contraste, manantiales de esta subcuenca han registrado valores de DBO_5 de hasta 104.5 mg/L en época post-lluvias, superando incluso las predicciones medias para el Atoyac, lo cual se atribuye al arrastre de sedimentos y materia orgánica tras eventos meteorológicos extremos [5].

Esto indica que, si bien el Atoyac tiene una carga industrial crónica, otros cuerpos de agua en el estado sufren picos agudos de contaminación orgánica ligados a la estacionalidad y falta de saneamiento rural.

VII. CONCLUSIÓN

La adaptación del modelo a la cuenca Atoyac-Salado en Oaxaca ha permitido evidenciar la gravedad de la contaminación. La integración de datos históricos de temperatura, pH, DQO y SST ha robustecido el análisis, demostrando que existe una fuerte correlación entre la carga química y la demanda biológica de oxígeno. El simulador desarrollado es una herramienta eficaz para el monitoreo rápido en los Valles Centrales.

Considerando la evidencia adicional de las cuencas Copalita y Los Perros, se recomienda a las autoridades locales no solo utilizar modelos predictivos fisicoquímicos, sino también integrar **monitoreos biológicos** (macroinvertebrados) para evaluar la salud integral del ecosistema a largo plazo. Asimismo, es urgente atender las descargas difusas de origen agrícola y optimizar las plantas de tratamiento existentes para abatir la carga de DQO refractaria y patógenos que tanto el modelo como los estudios de campo han detectado [5], [6].

REFERENCIAS

- [1] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), "Diagnóstico de la calidad del agua de ríos de Oaxaca: Resultados de la Red Nacional de Medición 2012-2020," 2018.
- [2] SEMARNAT, "Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales," Diario Oficial de la Federación, 2022.

- [3] A. Qasaimeh and Z. Al-Ghazawi, "Regression modeling for rapid prediction of wastewater BOD5," *Desalination and Water Treatment*, vol. 201, 2020.
- [4] CNDH, "Recomendación 57/2020 sobre la contaminación del río Atoyac," 2020.
- [5] A. A. García-Ortiz, S. Lozano-Trejo, et al., "Calidad del agua e integridad biótica en manantiales de la subcuenca Río Copalita, Oaxaca," *Hidrobiológica*, vol. 34, no. 2, pp. 81-93, 2024.
- [6] E. Mendoza-Amézquita y J. A. Seim, "Calidad del agua del río Los Perros (parte alta), Oaxaca, México," *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, vol. 11, no. 29, pp. 1-12, 2020.