

COMPARACIÓN DE TASAS DE REAIREACIÓN (K_a) EN RÍOS ANDINOS
COLOMBIANOS FRENTE A ECUACIONES EMPÍRICAS PARA MODELOS DE CALIDAD
DEL AGUA



SONIA MARCELA MARTINEZ ARDILA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2026

COMPARACIÓN DE TASAS DE REAIREACIÓN (Ka) EN RÍOS ANDINOS
COLOMBIANOS FRENTE A ECUACIONES EMPÍRICAS PARA MODELOS DE CALIDAD
DEL AGUA

SONIA MARCELA MARTINEZ ARDILA

Estado del Arte presentado como requisito para optar al título de Ingeniería Ambiental

Director

Ing. Mg. JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO

Magister en Hidrosistemas

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2026

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGU, O.P.

Vicerrector Académico General

P. Luis Antonio ALFONSO VARGAS, O. P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Seccional Villavicencio

PhD. RAQUEL ROMERO PUENTES

Decano de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Contenido

	Pág.
Resumen	8
Abstract.....	9
1. Introducción.....	10
2. Desarrollo del estado del arte	15
2.1. Delimitación del problema y parámetros de la muestra documental.....	15
3. El modelo Streeter-Phelps y su implementación en Colombia	20
3.1. Formulación matemática y supuestos	20
3.2. Implementación institucional en Colombia	21
3.3. Valores Ka y Kd reportados en ríos andinos colombianos	22
3.3.1 Síntesis por cuencas	22
4. Discusión	27
5. Conclusiones y recomendaciones.....	30
6. Referencias bibliográficas	31
7. Anexos.....	39

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1 Síntesis por cuencas	22
---	----

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Publicaciones por década	17
Figura 2 Tipo de documento	17
Figura 3 Origen geográfico.....	18
Figura 4 Instituciones destacadas	19

Lista de Anexos

Pág.

Anexo 1 Base de datos bibliográfica para modelación Ka/Kd en Ríos Andinos >1.500 m.s.n.m.	39
---	----

Resumen

En este trabajo se desarrolló una revisión bibliográfica sobre los estudios de caso con un alcance a nivel de tramo en ríos andinos colombianos, donde se relaciona la modelación de la calidad del agua con la determinación experimental, calibración y aplicación de las tasas cinéticas de desoxigenación (K_1 o K_d) y reaireación (K_2 o K_a) como parámetros fundamentales del modelo Streeter-Phelps y sus derivaciones como la curva SAG o de otros modelos de calidad del agua más complejos, que de igual forma utilizan las ecuaciones de Streeter-Phelps para la determinación del OD. Los distintos enfoques revisados abordan la determinación experimental de K_a mediante trazadores como SF_6 y Rodamina WT en ríos de montaña latinoamericanas; la estimación de constantes de desoxigenación carbonácea a partir de datos de DBO última carbonácea y parámetros hidráulicos medidos en campo; la calibración de modelos como OTIS, QUAL2K y HEC-RAS con datos locales; la comparación crítica de ecuaciones predictivas empíricas de origen norteamericano y europeo frente a condiciones hidráulicas propias de ríos andinos; y la vinculación de estos modelos con instrumentos de gestión integral de cuencas hidrográficas como los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y los programas de objetivos de calidad del agua establecidos por las Corporaciones Autónomas Regionales para los cuerpos de agua superficiales. La revisión sistemática de la literatura evidencia que los valores de K_a medidos experimentalmente en ríos andinos colombianos superan significativamente los predichos por las ecuaciones empíricas clásicas de origen norteamericano y europeo, confirmando la inadecuación de estos modelos para condiciones hidráulicas de alta montaña. En Colombia, los objetivos de calidad del agua constituyen el instrumento técnico y normativo mediante el cual las CAR, las Secretarías de Medio Ambiente y las alcaldías definen, por tramo de cuenca, los valores máximos permisibles de DBO y los mínimos admisibles de Oxígeno Disuelto (OD), cuya correcta formulación depende de modelos de calidad del agua con parámetros cinéticos confiables. La base de datos de K_a para ríos andinos colombianos permanece dispersa y sin regionalización altitudinal, lo que representa el principal vacío identificado y la línea de investigación futura más urgente para fortalecer la gestión integral de cuencas hidrográficas.

Palabras Clave: Tasa de reaireación, desoxigenación, modelo Streeter-Phelps, curva SAG, QUAL2K, ríos andinos, calidad del agua, oxígeno disuelto.

Abstract

This study presents a literature review of case studies at the river section level in Colombian Andean rivers, linking water quality modelling with the experimental determination, calibration and application of the kinetic rates of deoxygenation (K_1 o K_d) and re-aeration (K_2 o K_a) as fundamental parameters of the Streeter-Phelps model and its derivatives, such as the SAG curve or other more complex water quality models, which likewise use the Streeter-Phelps equations to determine DO. The various approaches reviewed address the experimental determination of K_a using tracers such as SF_6 and Rhodamine WT in Latin American mountain rivers; the estimation of carbonaceous deoxygenation constants from final carbonaceous BOD data and hydraulic parameters measured in the field; the calibration of models such as OTIS, QUAL2K and HEC-RAS with local data; the critical comparison of empirical predictive equations of North American and European origin against the hydraulic conditions typical of Andean rivers; and the integration of these models with comprehensive river basin management tools such as the River Basin Management Plans (POMCA) and the water quality objectives programs established by the Regional Autonomous Corporations for surface water bodies. A systematic review of the literature shows that the K_a values measured experimentally in Colombian Andean rivers significantly exceed those predicted by classical empirical equations of North American and European origin, confirming the unsuitability of these models for high-mountain hydraulic conditions. In Colombia, water quality objectives constitute the technical and regulatory instrument through which the Regional Water Authorities (CARs), the Secretariats of the Environment and local councils define, for each river basin section, the maximum permissible BOD values and the minimum permissible dissolved oxygen (DO) levels, the correct formulation of which depends on water quality models with reliable kinetic parameters. The K_a database for Colombian Andean rivers remains scattered and lacks altitudinal regionalization, which represents the main gap identified and the most urgent area for future research to strengthen integrated river basin management.

Key Words: Reaeration rate, deoxygenation, Streeter-Phelps model, SAG curve, QUAL2K, Andean rivers, water quality, dissolved oxygen.

1. Introducción

La calidad del agua en los ríos colombianos representa uno de los desafíos ambientales más urgentes del país. La creciente presión demográfica, el incremento de vertimientos de aguas de fuentes puntuales domésticas e industriales, también aguas residuales difusas del sector agrícola y la limitada cobertura de sistemas de tratamiento en numerosos municipios han generado condiciones críticas de deterioro en los parámetros fisicoquímicos de los cuerpos hídricos andinos, con especial impacto sobre el oxígeno disuelto (OD), variable que rige la vida acuática y los procesos de autodepuración natural (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR], 2023; Presidencia de la República de Colombia, 2015, Decreto 1076). El Estudio Nacional del Agua (ENA) señaló que más del 60% de los tramos monitoreados en cuencas andinas colombianas presentan déficits de oxígeno disuelto atribuibles a cargas orgánicas de origen doméstico no tratadas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2022). En este escenario, la modelación matemática de la calidad del agua se convierte en herramienta indispensable para la evaluación ambiental de los vertimientos, la planificación del recurso hídrico, la definición de objetivos de calidad para los diferentes tramos en las cuencas de los ríos y la evaluación de escenarios de manejo de cargas contaminantes en el marco de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) (Presidencia de la República de Colombia, 2012, Decreto 1640).

Los modelos de calidad del agua contemporáneos se fundamentan en el modelo clásico de Streeter-Phelps de 1925, el cual describe la evolución del déficit de oxígeno disuelto a lo largo de un río como el balance entre la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la reaireación natural. Este concepto constituye el núcleo de los softwares de simulación más utilizados en Colombia, tales como QUAL2K, HEC-RAS y WASP (Chapra et al., 2008; Environmental Protection Agency [EPA], 2023; US Army Corps of Engineers [USACE], 2023). La ecuación diferencial fundamental que rige el déficit de oxígeno disuelto en este modelo se expresa de la siguiente manera (Chapra, 1997):

$$\frac{dD}{dt} = K_d * L - K_a * D$$

donde D es el déficit de oxígeno disuelto (mg/L), K_d la tasa de desoxigenación (d⁻¹), L es la DBO remanente (mg/L) y K_a es la tasa de reaireación (d⁻¹). La solución analítica de esta ecuación

produce la denominada curva SAG el perfil de oxígeno disuelto (OD) que desciende hasta un mínimo crítico aguas debajo de un vertimiento o afluente que altera las condiciones iniciales de oxígeno disuelto, y luego se recupera progresivamente, cuya forma depende críticamente de los valores de ambas constantes (Chapra, 1997; Lung, 2023). Desde su formulación original, este modelo ha sido el referente principal para decisiones de gestión de vertimientos y establecimiento de capacidades de asimilación de carga orgánica en cuerpos hídricos superficiales a nivel mundial (Cox, 2003; Streeter & Phelps, 1925).

En dicho modelo, dos tasas cinéticas son determinantes. La tasa de desoxigenación K_d (d⁻¹) cuantifica la velocidad a la que la materia orgánica consume el OD por degradación biológica. Su valor típico en ríos oscila entre 0,05 y 0,5 d⁻¹ a 20 °C y se estima mediante ensayos de DBO en laboratorio empleando métodos gráficos como el de Thomas o de mínimos cuadrados (Brown & Barnwell, 1987). Para su corrección por temperatura se aplica la ecuación general de Arrhenius (O'Connor & Dobbins, 1958):

$$K(T) = K(20) * \theta^{(T-20)}$$

donde θ (theta) es el coeficiente de corrección por temperatura, T es la temperatura del agua en °C y K (20) es la tasa a la temperatura de referencia de 20°C. Este coeficiente difiere según la tasa considerada: para la tasa de desoxigenación K_d se adopta $\theta = 1,047$, valor que refleja la mayor sensibilidad de los procesos biológicos de degradación de materia orgánica a los cambios de temperatura; mientras que para la tasa de reaireación K_a se adopta $\theta = 1,024$, valor menor dado que la transferencia de gas en la interfaz agua-atmósfera depende principalmente de factores físicos como la viscosidad y la difusividad molecular, menos sensibles a la temperatura que las reacciones bioquímicas (Chapra, 1997).

La tasa de reaireación K_a (d⁻¹) cuantifica la velocidad a la que el río absorbe oxígeno desde la atmósfera para compensar el déficit respecto a la saturación, con corrección por temperatura (Wilson & MacLeod, 1974):

$$K_d(T) = K_d(20) * 1,047^{(T-20)}$$

$$K_a(T) = K_a(20) * 1,024^{(T-20)}$$

A pesar de su importancia fundamental, la determinación precisa de K_a en ríos andinos colombianos continúa siendo un problema abierto. Las ecuaciones empíricas clásicas de carácter internacional fueron desarrolladas a partir de datos en ríos de planicie norteamericanos e ingleses con profundidades medias superiores a 1 m y pendientes inferiores a 0,001 m/m (Churchill et al., 1962; Langbein & Durum, 1967; O'Connor & Dobbins, 1958; Owens et al., 1964). Los ríos andinos colombianos presentan condiciones hidráulicas radicalmente distintas, como pendientes que pueden superar 0,03 m/m, profundidades inferiores a 0,5 m, alta rugosidad del lecho y secuencias frecuentes de rápidos y pozas que generan niveles de turbulencia excepcionalmente altos (Arenas Faura, 2005; Rivera Gutiérrez, 2016). Cuando se aplican las ecuaciones empíricas a estos ríos, los errores de predicción medidos mediante el Error Medio Multiplicativo (EMM) alcanzan uno y dos órdenes de magnitud, con consecuencias directas sobre la confiabilidad de los perfiles de oxígeno disuelto simulados (Pazmiño-Rodríguez et al., 2018).

La relación física fundamental que explica este comportamiento diferencial es el cociente:

$$K_a = \frac{K_L}{H}$$

donde K_L es el coeficiente de transferencia de masa gaseosa en la capa límite líquida (m/d) y H es la profundidad media del flujo (m). Esta dependencia establece que a menor profundidad condición característica de ríos andinos de alta montaña mayor es K_a, lo que explica por qué en algunas investigaciones en ríos andinos, como en el río Guavio que presenta pendientes superiores al 1%, presentó valores de K_a entre 108 y 114 d⁻¹, frente a los 1-5 d⁻¹ que predicen las ecuaciones de planicie para ese tramo (Arenas Faura, 2005; Holguín González, 2003).

En Colombia, la gestión integral de los recursos hídricos está articulada normativamente mediante el Decreto 1076 de 2015 y los instrumentos de planificación de cuencas (Presidencia de la República de Colombia, 2015). En este marco, las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), las Secretarías de Medio Ambiente y las alcaldías tienen la responsabilidad de definir objetivos de calidad del agua por tramo de cuenca, estableciendo valores máximos admisibles de DBO y valores mínimos de OD en función de los usos del recurso hídrico y los servicios ecosistémicos de cada segmento (cuenca alta, media y baja) (IDEAM, 2022). El caso más avanzado del país es el del río Bogotá, donde la CAR Cundinamarca definió mediante el Acuerdo 043 de 2006 los objetivos de calidad para toda la cuenca, con modelación basada en QUAL2Kw

(CAR, 2006). Sin embargo, la confiabilidad de estos ejercicios de modelación depende directamente de la precisión con que se estiman K_d y K_a para las condiciones locales de cada cuenca andina (Fajardo Martínez & Agudelo V, 2019). Adicionalmente, para el trámite de los permisos de vertimiento otorgados por las autoridades ambientales se exige una Evaluación Ambiental del Vertimiento (EAV), para la cual es necesaria la modelación del comportamiento del vertimiento en la fuente receptora; y a su vez los modelos de calidad del agua necesitan la calibración del valor K_a para representar adecuadamente el cambio del oxígeno disuelto en el cauce producto de ese vertimiento (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

El diagnóstico de la literatura colombiana revela un vacío técnico significativo mientras que la demanda institucional de modelos de calidad del agua para la gestión de cuencas ha crecido significativamente en la última década reflejada en los POMCA de las principales cuencas andinas y en el ENA (IDEAM, 2022), la base de datos de K_d y K_a calibrados específicamente para ríos andinos colombianos permanece dispersa, no sistematizada y sin regionalización altitudinal (Arroyave Gómez et al., 2014). Los estudios disponibles ríos Bogotá, Fucha, Tunjuelo, Frío, La Vieja, Guavio, son puntuales, sin coherencia metodológica entre sí, y en la mayoría de los casos recurrieron a ecuaciones de origen norteamericano como punto de partida de la calibración (Jaramillo et al., 2016).

Esta situación genera consecuencias directas sobre la toma de decisiones ambientales. Las entidades territoriales que operan modelos como QUAL2K, HEC-RAS o WASP para definir capacidades de asimilación de cargas contaminantes, regular vertimientos o establecer programas de seguimiento de objetivos de calidad, se ven obligadas a iniciar cada nuevo proyecto de modelación desde cero sin poder recurrir a una base de datos regionalizada de K_d y K_a para ríos andinos colombianos, lo que incrementa los costos técnicos, introduce incertidumbre metodológica y puede derivar en decisiones de gestión basadas en modelos pobremente calibrados (Moriasi et al., 2007). Este hallazgo es consistente con estudios en otros contextos, que también identifican la reaeración como una fuente crítica de incertidumbre en la modelación del oxígeno disuelto (Melching & Yoon, 1996).

El objeto de estudio del presente estado del arte es, por tanto, la búsqueda científica disponible sobre la determinación, calibración y aplicación de K_d y K_a en modelos de calidad del agua para ríos andinos colombianos, analizada de manera crítica con el propósito de identificar avances, controversias, vacíos y tendencias que orienten la construcción de una base de datos

regionalizada de parámetros cinéticos para ríos andinos, herramienta fundamental que las CAR y demás entidades gestoras de cuencas necesitan para correr modelos de calidad del agua con mayor confiabilidad técnica.

2. Desarrollo del estado del arte

2.1. Delimitación del problema y parámetros de la muestra documental

La búsqueda bibliográfica se realizó con libros desde el año 1924, artículos, informes, tesis y normas que van hasta el año 2025; en las bases de datos Scopus, Web of Science, SciELO Colombia, Google Scholar, el Repositorio Institucional Séneca de la Universidad de los Andes y los repositorios institucionales de la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de Santander (UTS) y la Universidad Pontificia Bolivariana. Se emplearon las ecuaciones de búsqueda como:

- TIT+ABS+KEY("reaeration rate") AND ("Andean rivers" OR "mountain rivers") AND ("water quality model")
- TIT+ABS+KEY("reaeration rate") AND ("Colombian rivers") AND ("dissolved oxygen")
- TIT+ABS+KEY("Streeter-Phelps model") AND ("Colombia") AND ("dissolved oxygen")
- TIT+ABS+KEY("QUAL2K" OR "QUAL2Kw") AND ("calibration") AND ("Colombia")
- TIT+ABS+KEY("reaeration coefficient" OR " K_a ") AND ("mountain stream") AND ("empirical equations")
- TIT+ABS+KEY("SAG curve") AND ("dissolved oxygen") AND ("Andean rivers")
- TIT+ABS+KEY("deoxygenation rate" OR " K_d ") AND ("Andean rivers") AND ("water quality")

Se identificaron inicialmente 187 documentos, de los cuales 48 cumplieron los criterios de búsqueda los cuales fueron:

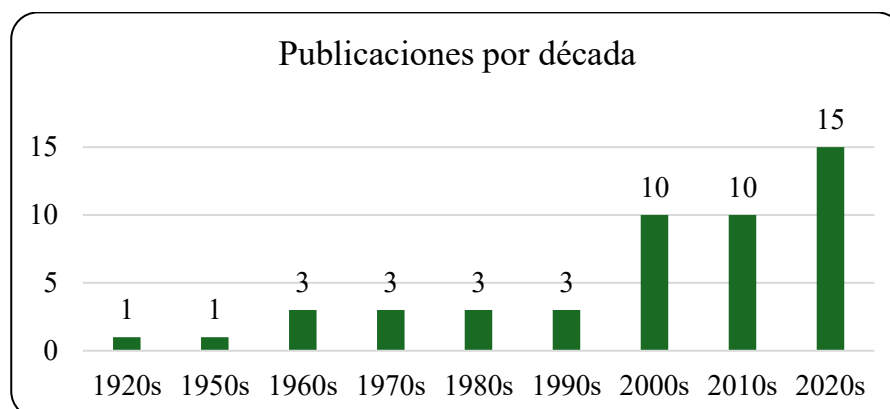
- Estudios sobre ríos colombianos o andinos latinoamericanos con altitud ≥ 1.500 m.s.n.m. Guavio, Teusacá, Bogotá alto, Frío, Pamplonita, Yanuncay.
- Documentos que reportan valores de K_a y/o K_d obtenidos por medición directa, calibración de modelos o estimación empírica.
- Publicaciones con filiación institucional verificable o publicadas en revistas.

- Documentos publicados entre 1924 y 2025 en bases de datos como Scopus, Web of Science, SciELO Colombia, Google Scholar y repositorios institucionales universitarios.

El enfoque epistemológico adoptado es el análisis crítico-integrador no se realiza un inventario cronológico de estudios, sino un análisis por dimensiones temáticas que permite identificar patrones, contradicciones y vacíos en el conocimiento acumulado de estas investigaciones. Las dimensiones temáticas estructurantes del estado del arte son:

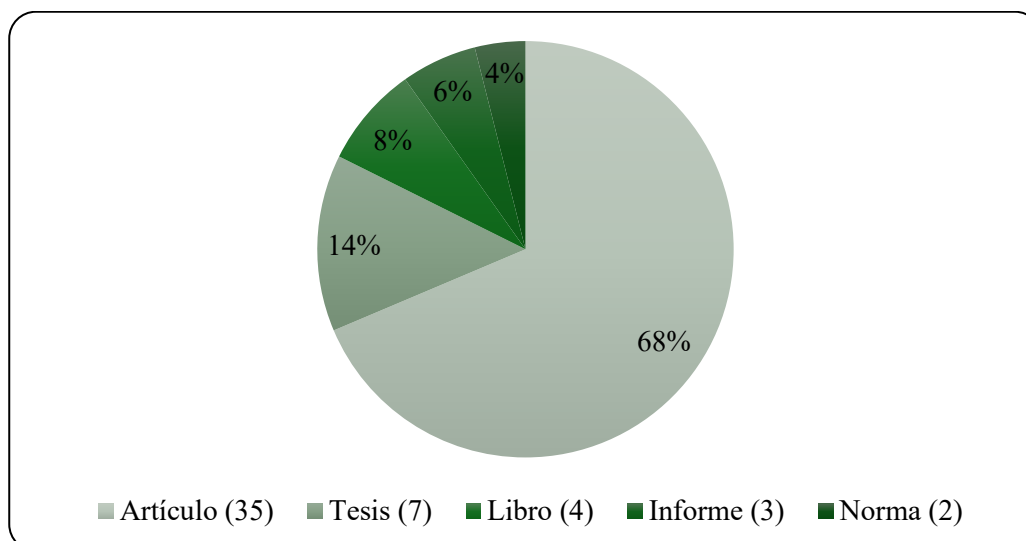
- Fundamentos del modelo de Streeter-Phelps y su implementación en Colombia.
- Ecuaciones empíricas de K_a y su validez en ríos andinos.
- Valores de K_a y K_d reportados por cuencas colombianas y modelos computacionales empleados.
- Vinculación con la gestión de cuencas y los objetivos de calidad del agua.

A continuación, en el **Anexo 1** se presenta la base de datos bibliográfica construida a partir de los 48 documentos que cumplieron los criterios mencionados anteriormente, organizados según año de publicación, autor(es), tipo de documento, aporte principal al estado del arte e idioma. El análisis bibliométrico de los 48 documentos seleccionados revela las principales tendencias de la producción científica sobre modelación de K_a en ríos andinos colombianos, en términos de distribución temporal, tipo de documento, idioma, origen geográfico e instituciones representadas. Las gráficas sintetizan estos hallazgos y se describen a continuación:

Figura 1*Publicaciones por década*

Nota. Datos tomados de la base de datos elaborada en el 2026.

La producción científica sobre el tema ha crecido de manera sostenida. Aunque entre 1920 y 1990 los estudios fueron escasos y se enfocaron en las bases teóricas del modelo Streeter-Phelps, desde el año 2000 el interés aumentó notablemente. En los últimos 15 años se concentra más de la mitad de la producción revisada, evidenciando la creciente importancia de estas herramientas para la gestión de cuencas hidrográficas en Colombia (Chapra, 1997).

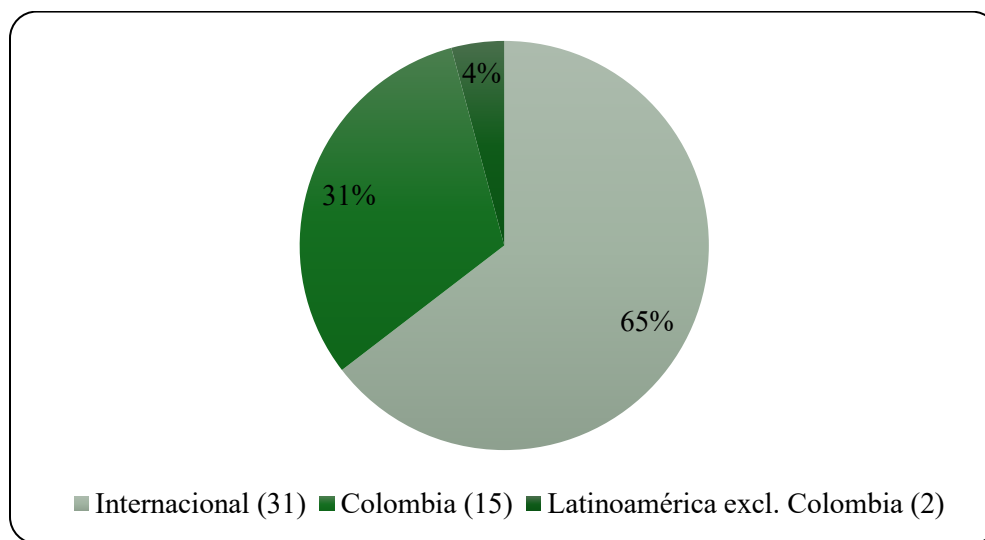
Figura 2*Tipo de documento*

Nota. Datos tomados de la base de datos elaborada en el 2026.

Los artículos científicos son el tipo de documento más frecuente, representando cerca de tres cuartas partes de la bibliografía revisada. Las tesis de pregrado y maestría del repositorio de la Universidad de los Andes resultan especialmente valiosas porque concentran los estudios con medición experimental directa de K_a en ríos andinos colombianos (Porras, 2004). Los libros, informes técnicos y normas complementan el marco teórico y regulatorio del tema.

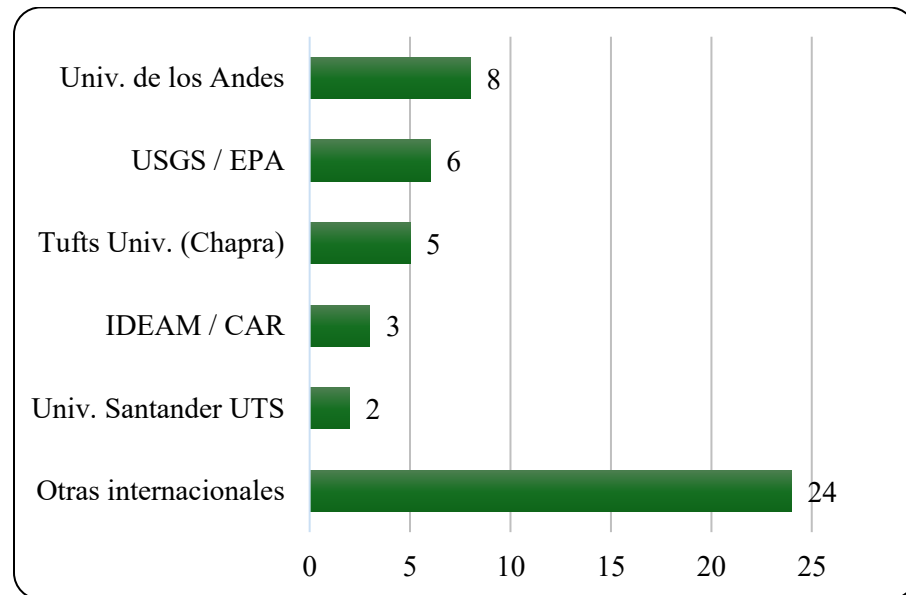
Figura 3

Origen geográfico



Nota. Datos tomados de la base de datos elaborada en el 2026.

Más de la mitad de los documentos revisados proviene de instituciones de Estados Unidos, Reino Unido y Europa, donde se desarrollaron históricamente las ecuaciones empíricas clásicas de K_a . Colombia es el país latinoamericano con mayor aporte al tema, seguido de Ecuador y Argentina con estudios puntuales, lo que confirma el vacío de investigación sobre ríos andinos fuera del contexto colombiano (Lees et al., 2000).

Figura 4*Instituciones destacadas*

Nota. Datos tomados de la base de datos elaborada en el 2026.

La Universidad de los Andes lidera la producción colombiana con 8 documentos, impulsada por el trabajo del investigador Luis Alejandro Camacho Botero, autor de referencia en modelación de calidad del agua para ríos andinos colombianos. En el contexto internacional, el USGS/EPA de Estados Unidos aporta 6 documentos y la Universidad de Tufts, a través de Steven C. Chapra, aporta 5, siendo estas las instituciones de mayor influencia; en particular, Chapra (1997) constituye la referencia teórica central del estado del arte. A nivel institucional colombiano, el IDEAM y la CAR aportan 3 documentos de carácter normativo e institucional, fundamentales para el contexto de gestión de cuencas.

3. El modelo Streeter-Phelps y su implementación en Colombia

3.1. Formulación matemática y supuestos

El modelo de Streeter y Phelps, publicado originalmente en el año 1925 para el río Ohio en EE. UU., describe el balance de oxígeno disuelto en un río receptor de una descarga orgánica mediante dos ecuaciones diferenciales acopladas (Chapra, 1997). Chapra (1997), en su obra de referencia sobre modelación de calidad del agua superficial, formaliza el sistema completo en la Parte IV de su libro. La DBO remanente L evoluciona como:

$$L(t) = L_o * e^{(-K_d * t)}$$

y la solución analítica para el déficit de OD ($D = OD_s - OD$) aguas abajo de una fuente puntual es:

$$D(t) = \left[\frac{K_d * L_o}{K_a - K_d} \right] * (e^{(-K_d * t)} - e^{(-K_a * t)}) + D_o * e^{(-K_a * t)}$$

donde OD_s es la concentración de saturación de OD que en ríos andinos se corrige por altitud mediante $OD_s(alt) = OD_s(\text{nivel del mar}) * \exp(-0,0001284 * \text{altitud(m)})$ L_o y D_o son la DBO y el déficit inicial en el punto de mezcla vertimiento-río, y $t = \frac{x}{U}$ es el tiempo de viaje (Chapra, 1997). El tiempo crítico t_c al que el OD alcanza su mínimo es:

$$t_c = \frac{1}{(K_a - K_d)} * \ln \left[\left(\frac{K_a}{K_d} \right) * \left(1 - \frac{D_o(K_a - K_d)}{K_d * L_o} \right) \right]$$

Los supuestos del modelo son estado permanente, flujo pistón (plug flow), única fuente puntual de DBO, mezcla completa en la sección transversal, K_a y K_d constantes en cada tramo, y ausencia de fotosíntesis, respiración algal y demanda bentónica en su formulación básica. Estos supuestos son aceptables para análisis de primer orden en ríos andinos de caudal bajo moderado y

pendiente relativamente uniforme, aunque los modelos extendidos como QUAL2K incorporan términos adicionales para superar estas limitaciones (Chapra et al., 2008).

La constante de autopurificación $f = K_a/K_d$, introducida por Fair en 1939 y recuperada por Chapra et al. (2021), es un indicador adimensional de la capacidad de autodepuración del río. Para ríos de alta velocidad y energía como los andinos, f puede superar el valor de 20, lo que implica una capacidad de asimilación de DBO muy alta en comparación con ríos de planicie (f de 0.5–2.0). Sin embargo, esta alta capacidad se ve parcialmente contrarrestada por la menor concentración de saturación de OD a mayores altitudes.

3.2. Implementación institucional en Colombia

En Colombia, la aplicación del modelo de Streeter-Phelps y sus derivaciones está enmarcada en el mandato legal de la Presidencia de la República de Colombia, a través del Decreto 1076 de 2015 y el Decreto 1640 de 2012, que obligan a las CAR a establecer objetivos de calidad del agua por tramo de cuenca mediante modelación matemática validada con datos de campo. La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR, 2006) es la entidad con el proceso más avanzado del país: mediante el Acuerdo 043 de 2006, estableció los objetivos de calidad para la cuenca del río Bogotá, diferenciando condiciones en la cuenca alta (DBO máx. 5 mg/L, OD mín. 5 mg/L), media (DBO máx. 30 mg/L, OD mín. 2 mg/L) y baja (DBO máx. 50 mg/L, OD mín. 1 mg/L). Posteriormente, la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA, 2009), mediante la Resolución 3956 de 2009, adoptó la norma técnica para el control y manejo de los vertimientos en el Distrito Capital, aplicando dichos objetivos de calidad al perímetro urbano. Actualmente, la CAR utiliza QUAL2Kw como herramienta de simulación para apoyar la definición de las metas de carga contaminante de la cuenca del río Bogotá para el periodo 2025-2029 (CAR, 2024).

Esta diferenciación de objetivos por tramo responde a los servicios ecosistémicos de cada segmento: la cuenca alta es fuente de abastecimiento para el acueducto de Bogotá (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá [EAAB], s.f.), lo que exige estándares más estrictos; la cuenca media recibe las descargas de la ciudad y requiere objetivos intermedios; y la cuenca baja actúa como sistema de dilución y asimilación previo a la desembocadura en el río Magdalena. La modelación con QUAL2K es el instrumento que conecta los objetivos normativos con las

decisiones de diseño de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y los permisos de vertimiento.

3.3. Valores Ka y Kd reportados en ríos andinos colombianos

3.3.1 Síntesis por cuencas

La revisión sistemática de la literatura permitió construir la tabla síntesis para ríos andinos colombianos. Los valores se expresan a temperatura de referencia de 20 °C según el modelo.

Tabla 1

Síntesis por cuencas

Río / Cuenca	Altitud (m.s.n.m.)	Ka (d ⁻¹)	Kd (d ⁻¹)	Método Ka	Modelo	Fuente
Guavio (Cundinamarca)	1.600–2.200	99–114	No reportado	Trazador SF ₆ + Rodamina WT	OTIS / ADZ	(Holguín González, 2003)
Teusacá (Cundinamarca)	2.550–2.650	Fórmulas empíricas (sin medición directa)	Kd = 0,12–0,30	Sin medición directa; laboratorio DBO 20 días	QUAL2K	(Sánchez Cárdenas, 2015)
Bogotá alto (Villapinzón-Chocontá)	2.550–2.600	1,5–4,0 (calibrado)	0,10–0,25 (calibrado)	O'Connor-Dobbins; Calibración QUAL2K	QUAL2K / QUASAR-MDLC	(Porras, 2004)
Bogotá alto (subcuenca HEC-RAS)	2600	0,12–0,23 (bibliografía)	0,12–0,23 (rango software)	(Langbein & Durum, 1967)	HEC-RAS 5.0	(Fajardo Martínez & Agudelo V, 2019)
Frío (Santander, zona alta)	1.800–2.091	6,4 (tramo San Ignacio)	0,38 (experimental)	Experimental OD/ODs en campo	QUAL2K 2.11	(Rivera Gutiérrez, 2016)
Frío (Santander, media)	750–1.800	1,0–3,0 (experimental)	0,34 (método Bosko)	Experimental	QUAL2K 2.11	(Rivera Gutiérrez, 2016)
Frío (Santander, DYNA)	900	5,0 (O'Connor-Dobbins)	0,30 (calibrado)	O'Connor-Dobbins; GLUE Monte Carlo	QUAL2K 2.07	(Rivera Gutiérrez, 2011)
Sinú (Córdoba)	<100 (planicie)	0,30–1,20 (calibrado)	0,10–0,55 (calibrado)	Calibración Streeter-Phelps; datos 2001-2014	Streeter-Phelps	(Feria Díaz et al., 2017)
Tunjuelo / Fucha (Bogotá D.C.)	2.300–2.600	Ka no reportado explícitamente	K1 calibrado con QUAL2K	Bibliografía Uniandes / SDA	QUAL2K	(Castaño Ossa, 2015)

Río / Cuenca	Altitud (m.s.n.m.)	K_a (d^{-1})	K_d (d^{-1})	Método K_a	Modelo	Fuente
Pamplonita (Norte de Santander)	900–1.200	K_a estimada por trazadores	K_d calibrado	Prueba de trazadores; QUAL2K calibrado	QUAL2K	(Rodríguez- Amezquita, 2021)
Algodonal (Norte de Santander)	500–1.200	Calibrado QUAL2K; rangos de Fair	K_1 laboratorio; K_d campo	GLUE Monte Carlo + laboratorio	QUAL2K	(Angarita Castilla, 2019)

Nota. Datos tomados de la base de datos elaborada en el 2026.

Con base en la síntesis realizada de las cuencas hidrográficas para los 11 ríos andinos considerados en el estudio, correspondientes a altitudes superiores a los 1500 msnm, se procedió a analizar los resultados obtenidos para el coeficiente de reaireación (K_a) en cada uno de ellos:

- Río Guavio Cundinamarca 1.600 a 2.200 m.s.n.m: La K_a entre 99 y 114 d^{-1} es el valor más alto de toda la tabla, lo que lo convierte en el caso más extremo documentado en Colombia. Estos valores se obtuvieron con trazadores reales (SF_6 + Rodamina WT), el método más confiable que existe, usando los modelos OTIS y ADZ. El hecho de que K_d no esté reportado es una limitación importante se sabe cuán rápido se reaírea el río, pero no cuán rápido consume oxígeno. Lo que esto dice del río es que su capacidad de autodepuración por reaírea es excepcional, posiblemente asociada a la alta pendiente y turbulencia de la zona cordillerana. Es la referencia más sólida metodológicamente de toda la tabla (Holguín González, 2003).
- Río Teusacá Cundinamarca 2.550 a 2.650 m.s.n.m: Este es el caso más débil metodológicamente. La K_a no se midió se estimó con fórmulas empíricas sin medición directa, lo que significa que no se sabe realmente cuánto vale para ese tramo. El K_d sí tiene respaldo experimental (laboratorio DBO 20 días, rango 0.12–0.30 d^{-1}). Está modelado con QUAL2K. Al estar entre 2.550 y 2.650 m.s.n.m., comparte condiciones de altitud con el Bogotá alto, por lo que la ausencia de K_a experimental es una brecha significativa, ya que en esa altitud el oxígeno de saturación ya empieza a reducirse y la K_a real podría diferir mucho de las fórmulas usadas (Sánchez Cárdenas, 2015).
- Río Bogotá alto tramo Villapinzón 2.550 a 2.600 m.s.n.m: La K_a entre 1.5 y 4.0 d^{-1} obtenida por calibración a partir de O'Connor-Dobbins, no por medición directa.

Esto es relevante porque significa que el valor de K_a es el que hizo que el modelo "le pegara a los puntos", pero partiendo de una ecuación foránea como punto de arranque. K_d entre 0.10 y 0.25 d^{-1} también calibrado. Usa QUAL2K y QUASAR-MDLC, es un tramo de importancia crítica porque es la cabecera del río más intervenido de Colombia y alimenta el sistema Tibitoc del acueducto de Bogotá (EAAB, s.f.). La confiabilidad del K_a depende directamente de qué tan bien partió la calibración (Porras, 2004).

- Río Bogotá alto subcuenca HEC-RAS 2.600 m.s.n.m: La K_a entre 0.12 y 0.23 d^{-1} según (Langbein & Durum, 1967) no calibrado ni medido, este es el valor más bajo de toda la tabla para un río andino de esa altitud, lo que es una señal de alerta (Langbein & Durum, 1967) es una ecuación desarrollada para ríos de planicie norteamericanos, y aplicarla directamente a un río andino de 2.600 m.s.n.m. casi con certeza subestima la K_a real. El K_d modelado con HEC-RAS ilustra perfectamente el problema central del trabajo usar datos foráneos sin calibración local puede llevar a resultados poco confiables (Fajardo Martínez & Agudelo V, 2019).
- Río Frío zona alta, tramo San Ignacio 1.800 a 2.091 m.s.n.m: La K_a de 6.4 d^{-1} obtenida experimentalmente midiendo OD/OD_s en campo, con K_d de 0.38 d^{-1} también experimental. Es el caso con mejor respaldo metodológico después del Guavio, porque ambas tasas son experimentales y no dependen de ecuaciones foráneas. El modelo usado es QUAL2K 2.11, el tramo de San Ignacio corresponde a la zona de mayor pendiente del río, lo que explica el K_a más alto de los tres tramos del Frío. Este río es posiblemente el mejor documentado de la tabla porque tiene tres tramos diferenciados con metodologías coherentes (Rivera Gutiérrez, 2016).
- Río Frío zona media 750 a 1.800 m.s.n.m: La K_a entre 1.0 y 3.0 d^{-1} experimental, K_d de 0.34 d^{-1} por método Bosko. Al bajar de altitud y pendiente, la K_a cae notablemente frente al tramo San Ignacio (de 6.4 a máximo 3.0 d^{-1}), lo que es consistente con la teoría menos turbulencia, menos reaireación. La comparación de los tres tramos del Frío en conjunto es el ejemplo más didáctico de cómo la altitud y la pendiente controlan la K_a en un río andino (Rivera Gutiérrez, 2016).

- Río Frío estudio DYNA - 900 m.s.n.m: K_a de 5.0 d^{-1} estimada por O'Connor-Dobbins y luego calibrada con GLUE Monte Carlo, K_d de 0.30 d^{-1} calibrado. El uso de GLUE Monte Carlo es metodológicamente más robusto que una calibración manual, ya que explora el espacio de parámetros de forma sistemática. Sin embargo, al partir de O'Connor-Dobbins y calibrar hasta 5.0 d^{-1} , el resultado converge con el experimental del tramo alto (6.4 d^{-1}), lo que da cierta consistencia interna entre los estudios del Frío, aunque son de autores y años distintos (Rivera Gutiérrez, 2011).
- Río Sinú Córdoba altitud menor a 100 m.s.n.m. (planicie): K_a entre 0.30 y 1.20 d^{-1} por calibración Streeter-Phelps con 14 años de datos (2001–2014). Este es el único río de planicie de la tabla, lo que lo hace el punto de contraste clave frente a los andinos. Su K_a es el más bajo después del Bogotá con Langbein, y es esperable dado que al estar en planicie costera no tiene la turbulencia ni la pendiente de los ríos andinos. Metodológicamente es muy sólido por la longitud del registro histórico (14 años), lo que da robustez estadística que ningún otro estudio de la tabla tiene (Feria Díaz et al., 2017).
- Ríos Tunjuelo y Fucha Bogotá D.C. 2.300 a 2.600 m.s.n.m: K_a no reportada explícitamente mientras que la K_d calibrado con QUAL2K a partir de bibliografía de Uniandes y la Secretaría Distrital de Ambiente. Este caso es problemático son dos de los ríos urbanos más deteriorados de Colombia, con cargas orgánicas extremas, y sin un K_a experimental propio. Cualquier modelación de calidad del agua para estos ríos está trabajando con una K_a incierta, lo que compromete directamente la confiabilidad de los perfiles de OD simulados y las decisiones de manejo de vertimientos basadas en esos modelos (Castaño Ossa, 2015).
- Río Pamplonita Norte de Santander 900 a 1.200 m.s.n.m: La K_a estimada por trazadores y calibrada con QUAL2K. Es uno de los pocos casos junto con el Guavio y el Frío donde se usaron trazadores, lo que le da mayor confiabilidad metodológica. K_d también calibrado, el rango de altitud 900–1.200 m.s.n.m. lo ubica en una zona de transición entre ríos andinos de montaña y ríos de piedemonte, lo que hace que sus valores sean de referencia para esa franja altitudinal que está poco representada en la tabla (Rodríguez-Amezquita, 2021).

- Río Algodonal Norte de Santander 500 a 1.200 m.s.n.m: La K_a calibrada con QUAL2K usando GLUE Monte Carlo, rangos de Fair para K_a inicial, K_d de laboratorio y campo. Metodológicamente comparte con el estudio DYNA del Frío el uso de GLUE Monte Carlo, que es uno de los enfoques de calibración más rigurosos. El rango de altitud es amplio (700 m de diferencia entre tramos), lo que sugiere que la K_a puede variar significativamente dentro del mismo río. K_d tiene el respaldo adicional de datos de campo, lo que fortalece la estimación de la demanda de oxígeno (Angarita Castilla, 2019).

4. Discusión

Los resultados del análisis de los once ríos andinos colombianos revisados permiten identificar tres enfoques metodológicos para la determinación de K_a , cada uno con implicaciones distintas en términos de precisión, costo y aplicabilidad en la gestión de cuencas hidrográficas.

El ensayo de trazadores constituye el método más confiable para la determinación de K_a en campo, ya que mide directamente la transferencia de gas bajo condiciones hidráulicas reales del tramo estudiado. El procedimiento consiste en inyectar simultáneamente un trazador gaseoso volátil (SF_6) y uno conservativo (Rodamina WT) en un punto del río; la relación entre la tasa de pérdida de ambos trazadores aguas abajo permite calcular K_a sin asumir condiciones de equilibrio ni depender de ecuaciones foráneas (Holguín González, 2003). De los once ríos revisados, solo el Guavio y el Pamplonita cuentan con medición directa mediante trazadores, lo que les otorga la mayor solidez metodológica de toda la revisión. El río Guavio reportó valores de K_a entre 99 y 114 d^{-1} , los más altos documentados en Colombia, asociados a su alta pendiente y turbulencia característica de la zona cordillerana (Holguín González, 2003). Sin embargo, este método implica equipos especializados, personal capacitado y costos elevados, lo que explica su escasa aplicación en los demás ríos andinos del país.

Así mismo en la determinación de K_a mediante algoritmos de autocalibración en software ejemplo el modelo QUAL2K, y en particular su versión QUAL2Kw, es el software más ampliamente utilizado en Colombia para la modelación de calidad del agua en ríos andinos, siendo el caso del río Bogotá con la CAR Cundinamarca el ejemplo más avanzado de su aplicación institucional (CAR, 2023). Una de sus características más relevantes es la incorporación del módulo de autocalibración de parámetros cinéticos mediante el algoritmo genético iterativo Pikaia, que realiza una búsqueda evolutiva en el espacio de parámetros evaluando miles de combinaciones posibles de K_a y K_d dentro de rangos definidos por el usuario, seleccionando aquella que minimiza el error entre los valores simulados y los medidos en campo de oxígeno disuelto y DBO (Chapra et al., 2008). Los casos del río Frío tramo DYNA y del río Algodonal ilustran la aplicación de este enfoque mediante el método GLUE Monte Carlo, considerado uno de los más rigurosos para la calibración de parámetros inciertos (Angarita Castilla, 2019; Rivera Gutiérrez, 2016). Sin embargo, la confiabilidad de este enfoque depende críticamente del rango de K_a que se defina como punto de partida; si ese rango se basa en ecuaciones empíricas de planicie, el algoritmo puede

converger hacia valores que no representan las condiciones hidráulicas reales del río andino, prolongando innecesariamente los tiempos computacionales y comprometiendo la validez del modelo calibrado, contar con una base de datos regionalizada de K_a para ríos andinos colombianos, diferenciada por rangos altitudinales, permitiría definir rangos de búsqueda más estrechos y realistas para Pikaia, mejorando tanto la eficiencia como la confiabilidad de la calibración.

Además, las ecuaciones empíricas de K_a de origen norteamericano y europeo fueron desarrolladas a partir de datos de ríos de planicie con profundidades superiores a 1 m y pendientes inferiores a 0,001 m/m, condiciones radicalmente distintas a las de los ríos andinos colombianos (Churchill et al., 1962; Langbein & Durum, 1967; O'Connor & Dobbins, 1958; Owens et al., 1964). La revisión de los once ríos evidencia que estas ecuaciones subestiman sistemáticamente los valores reales de K_a . El caso más ilustrativo es el río Bogotá alto modelado con HEC-RAS, donde se adoptó directamente el valor de (Langbein & Durum, 1967) sin calibración ni medición, obteniendo K_a entre 0,12 y 0,23 d^{-1} , el valor más bajo de toda la revisión para un río de 2.600 m.s.n.m., cuando los valores experimentales de ríos en rangos altitudinales similares superan ampliamente ese rango (Fajardo Martínez & Agudelo V, 2019).

Por otra parte, el análisis conjunto de los once ríos permite identificar una tendencia clara, los valores de K_a disminuyen a medida que descende la altitud y la pendiente del tramo estudiado. El río Frío es el ejemplo que demuestra esta tendencia, ya que cuenta con tres tramos diferenciados metodológicamente coherentes; en la zona alta de San Ignacio (1.800–2.091 m.s.n.m.) K_a alcanza 6,4 d^{-1} ; en la zona media (750–1.800 m.s.n.m.) cae entre 1,0 y 3,0 d^{-1} ; y en el tramo DYNA a 900 m.s.n.m. se estima en 5,0 d^{-1} por calibración (Rivera Gutiérrez, 2016). El contraste con el río Sinú, el único río de planicie de la revisión con altitud menor a 100 m.s.n.m., es especialmente revelador su K_a oscila entre 0,30 y 1,20 d^{-1} , sustentada en 14 años de registro histórico, confirmando que la reducción de turbulencia y pendiente en zonas de planicie disminuye significativamente la capacidad de reaireación del cuerpo de agua (Feria Díaz et al., 2017). El río Pamplonita, ubicado en una zona de transición entre ríos andinos y de piedemonte (900–1.200 m.s.n.m.), representa una franja altitudinal poco representada en la revisión y constituye una referencia valiosa para ese rango específico (Rodríguez-Amezquita, 2021).

Finalmente, la revisión pone en evidencia vacíos metodológicos significativos que comprometen la confiabilidad de los modelos de calidad del agua utilizados actualmente por las Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia. Los ríos Tunjuelo y Fucha, dos de los cuerpos

hídricos urbanos más deteriorados del país, no cuentan con K_a experimental propia, lo que significa que cualquier modelación de calidad del agua para estos ríos trabaja con un parámetro incierto y de origen foráneo, comprometiendo directamente la validez de las decisiones de manejo de vertimientos basadas en esos modelos (Castaño Ossa, 2015). De manera similar, el río Teusacá, pese a contar con medición experimental de K_d , carece de K_a medida directamente, siendo este un vacío relevante dado que su rango altitudinal (2.550–2.650 m.s.n.m.) coincide con el tramo alto del río Bogotá, donde la reducción del oxígeno de saturación por altitud hace que K_a adquiera mayor peso relativo en el balance de oxígeno disuelto (Sánchez Cárdenas, 2015). Estas brechas confirman que la construcción de una base de datos regionalizada de K_a calibrada experimentalmente para ríos andinos colombianos, diferenciada por rangos altitudinales, no es solo un aporte académico sino una necesidad técnica para fortalecer los procesos de otorgamiento de permisos de vertimiento, formulación de objetivos de calidad del agua y diseño de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) en el país.

5. Conclusiones y recomendaciones

La revisión sistemática de 48 documentos confirma que K_a es el parámetro que mayor incertidumbre introduce en los modelos de calidad del agua en ríos andinos colombianos, pues los valores medidos superan significativamente los predichos por ecuaciones empíricas clásicas no diseñadas para condiciones de alta pendiente y turbulencia. De los once ríos revisados, solo el Guavio y el Pamplonita cuentan con K_a medido mediante trazadores; el resto opera con valores calibrados o foráneos sin verificación local, lo que compromete la confiabilidad de las simulaciones. Se confirma además una fuerte dependencia altitudinal de K_a , no recogida en las ecuaciones clásicas, y una producción científica creciente pero fragmentada, concentrada principalmente en los aportes de la Universidad de los Andes a través de Luis Alfredo Camacho Botero.

Se recomienda medir experimentalmente K_a mediante trazadores en ríos urbanos sin dato propio y de alta demanda institucional (Tunjuelo, Fucha, Teusacá); construir una base de datos regionalizada de K_a por rangos altitudinales que sirva de referencia a las CAR; estandarizar el protocolo de medición y reporte del parámetro; calibrar el algoritmo Pikaia con valores experimentales regionales en lugar de ecuaciones de planicie; exigir desde el IDEAM y las CAR la validación del método de estimación de K_a en los procesos de POMCA; y ampliar futuras revisiones a ríos andinos de Ecuador, Perú, Bolivia y Argentina para construir una base comparativa latinoamericana.

6. Referencias bibliográficas

- Al-Saadi, B. J. M., & Al-Zubaidi, H. A. M. (2025). Reaeration coefficient empirical equation selection for water quality modeling in surface waterbodies: An integrated numerical-modeling-based technique with field case study. *Limnological Review*, 25(2), 15. <https://doi.org/10.3390/limnolrev25020015>
- Angarita Castilla, W. (2019). *Determinación del grado de autodepuración del río Algodonal, mediante la utilización de modelos de simulación Streeter & Phelps y Qual2k* [Tesis de maestría, Universidad de Manizales]. Repositorio Institucional RIDUM. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/4741>
- Arenas Faura, G. A. (2005). *Estimación experimental de la tasa de reaeración en ríos de montaña* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Séneca: Repositorio Institucional Uniandes. <https://doi.org/10.71590/1992/8956>
- Aristegi, L., Izagirre, O., & Elosegui, A. (2009). Comparison of several methods to calculate reaeration in streams, and their effects on estimation of metabolism. *Hydrobiologia*, 635(1), 113-124. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9904-8>
- Arora, S., & Keshari, A. K. (2018). Estimation of re-aeration coefficient using MLR for modelling water quality of rivers in urban environment. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, 430-435. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.11.006>
- Arora, S., & Keshari, A. K. (2022). Modelling re-aeration of rivers using predictive models and developed ANN models under varying hydrodynamic conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 67(15), 2294-2309. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2138402>
- Arora, S., & Keshari, A. K. (2023). Implementing machine learning algorithm to model reaeration coefficient of urbanized rivers. *Environmental Modeling & Assessment*, 28, 535-546. <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09895-0>
- Arroyave Gómez, D. M., Moreno Tovar, A. A., Toro Botero, F. M., Gallego Suárez, D. de J., & Carvajal Serna, L. F. (2014). Estudio del modelamiento de la calidad del agua del Río Sinú, Colombia. *Revista Ingenierías Universidad De Medellín*, 12(22), 33-44. <https://doi.org/10.22395/rium.v12n22a3>
- Benedini, M., & Tsakiris, G. (2013). *Water quality modelling for rivers and streams*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5509-3>

- Brown, L. C., & Barnwell, T. O. (1987). *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and user manual* (EPA/600/3-87/007). Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30000KGT.PDF?Dockey=30000KGT.PDF>
- Camacho, L. A., & Lees, M. J. (1999). Multilinear discrete lag-cascade model for channel routing. *Journal of Hydrology*, 226(1-2), 30-47. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00162-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00162-6)
- Cañón Zambrano, J. D. (2004). *Estudios con trazadores e investigación de modelos de transporte de solutos en un río de montaña - Quebrada Lejía* [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Séneca: Repositorio Institucional Uniandes. <https://hdl.handle.net/1992/21278>
- Castaño Ossa, J. M. (2015). *Modelación de la calidad del agua del río Tunjuelo en dos escenarios de implementación del plan de saneamiento de Bogotá* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56729>
- Chapra, S. C. (1997). *Surface water-quality modeling*. McGraw-Hill.
- Chapra, S. C., Camacho, L. A., & McBride, G. B. (2021). Impact of global warming on dissolved oxygen and BOD assimilative capacity of the world's rivers: Modeling analysis. *Water*, 13(17), 2408. <https://doi.org/10.3390/w13172408>
- Chapra, S. C., Pelletier, G. J., & Tao, H. (2008). *QUAL2K: A modeling framework for simulating river and stream water quality, version 2.11: Documentation and users manual*. Civil and Environmental Engineering Department, Tufts University.
- Churchill, M. A., Elmore, H. L., & Buckingham, R. A. (1962). The prediction of stream reaeration rates. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 88(4), 1-46.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2006). Acuerdo 043 de 2006, por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020. Diario Oficial No. 46.437. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=22067>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2023). *Boletín de calidad hídrica*. CAR. <https://www.car.gov.co/uploads/files/669945e54971e.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2024). *Establecimiento de metas de carga contaminante para la cuenca río Bogotá* (Informe Técnico DRN N.º 0265). <https://www.car.gov.co/uploads/files/673665f6de078.pdf>

- Cox, B. A. (2003). A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *Science of the Total Environment*, 314-316, 335-377. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00063-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00063-9)
- Danckwerts, P. V. (1951). Significance of liquid-film coefficients in gas absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, 43(6), 1460-1467. <https://doi.org/10.1021/ie50498a055>
- Darji, J., Lodha, P., & Tyagi, S. (2022). Assimilative capacity and water quality modeling of rivers: a review. *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 71(10), 1127-1147. <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.063>
- Díaz Merchán, B. E. (2004). *Modelación de la calidad del agua en el interceptor río Bogotá en los tramos Fucha - Tunjuelo - Canoas* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Séneca: Repositorio Institucional Uniandes. <https://doi.org/10.71590/1992/10312>
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). (s.f.). *Sistema Tibitoc*. <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemas-abastecimiento/captacion/sistema-tibitoc>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2023). *Water Quality Analysis Simulation Program (WASP8)* [Software]. Center for Exposure Assessment Modeling. <https://www.epa.gov/hydrowq/water-quality-analysis-simulation-program-wasp>
- Fajardo Martínez, D., & Agudelo V, R. (2019). Simulación de calidad del agua en la sub-cuenca río alto Bogotá durante el periodo 2014-2016 haciendo uso de HEC-RAS. *Revista Colombiana de Ciencia Animal – RECIA*, 11(2), 720. <https://doi.org/10.24188/recia.v11.n2.2019.720>
- Feria Díaz, J. J., Náder Salgado, D., & Meza Pérez, S. J. (2017). Tasas de desoxigenación y reaireación para el río Sinú. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 8-17. <https://doi.org/10.14482/inde.35.1.8940>
- Gelda, R. K., & Auer, M. T. (1996). Development and testing of a dissolved oxygen model for a hypereutrophic lake. *Lake and Reservoir Management*, 12(1), 165-179. <https://doi.org/10.1080/07438149609354006>
- González-Martínez, M. D., Huguet, C., Pearse, J., McIntyre, N., & Camacho, L. A. (2019). Assessment of potential contamination of Paramo soil and downstream water supplies in a coal-mining region of Colombia. *Applied Geochemistry*, 108, 104382. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104382>

- Gualtieri, C., Gualtieri, P., & Pulci Doria, G. (2002). Dimensional analysis of reaeration rate in streams. *Journal of Environmental Engineering*, 128(1), 12-18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2002\)128:1\(12\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128:1(12))
- Haider, H., Ali, W., & Haydar, S. (2013). Evaluation of various relationships of reaeration rate coefficient for modeling dissolved oxygen in a river with extreme flow variations in Pakistan. *Hydrological Processes*, 27(26), 3949-3963. <https://doi.org/10.1002/hyp.9528>
- Hall, R. O., & Ulseth, A. J. (2020). Gas exchange in streams and rivers. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(1), e1391. <https://doi.org/10.1002/wat2.1391>
- Holguín González, J. E. (2003). *Determinación de la tasa de reaireación en un río de montaña colombiano, mediante el uso de trazadores* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Séneca: Repositorio Institucional Uniandes. <https://doi.org/10.71590/1992/9089>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). *Estudio Nacional del Agua (ENA) 2022*. IDEAM. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/publicacion-jue-23032023-1200>
- Jaramillo, M. F., Galvis, A., Escobar, M., Forni, L., Purkey, D., Sieber, J., Lozano, G., Rodríguez, C., Castaño, J., & Sabas, C. (2016). Integración de los modelos WEAP y QUAL2K para la simulación de la calidad agua de fuentes superficiales. Caso de estudio: cuenca del río La Vieja, Colombia. *Aqua-LAC*, 8(2), 14-24. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2016-v8-2-02>
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., Kanel, S. R., & Pelletier, G. J. (2007). Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling*, 202(3-4), 503-517. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.12.033>
- Langbein, W. B., & Durum, W. H. (1967). *The aeration capacity of streams* (Geological Survey Circular 542). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/cir542>
- Lees, M. J., Camacho, L. A., & Chapra, S. C. (2000). On the relationship of transient storage and aggregated dead zone models of longitudinal solute transport in streams. *Water Resources Research*, 36(1), 213-224. <https://doi.org/10.1029/1999WR900265>
- Lewis, W. K., & Whitman, W. G. (1924). Principles of gas absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, 16(12), 1215-1220. <https://doi.org/10.1021/ie50180a002>

- Lung, W.-S. (2023). Progression of river BOD/DO modeling for water quality management. *Water Environment Research*, 95(4), e10864. <https://doi.org/10.1002/wer.10864>
- Matovelle, C. (2021). Analysis of a high Andean river's behavior at loads of organic matter through the use of mathematical models with experimentally determined kinetic rates. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 16(4), 675-682. <https://doi.org/10.18280/ijmdp.160407>
- Melching, C. S., & Flores, H. E. (1999). Reaeration equations derived from U.S. Geological Survey database. *Journal of Environmental Engineering*, 125(5), 407-414. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1999\)125:5\(407\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:5(407))
- Melching, C. S., & Yoon, C. G. (1996). Key sources of uncertainty in QUAL2E model of Passaic River. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(2), 105-113. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:2\(105\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:2(105))
- Mendivil-García, K., Amabilis-Sosa, L. E., Salinas-Juárez, M. G., Pat-Espadas, A., Rodríguez-Mata, A. E., Figueroa-Pérez, M. G., & Roé-Sosa, A. (2022). Climate change impact assessment on a tropical river resilience using the Streeter-Phelps dissolved oxygen model. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 903046. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.903046>
- Moog, D. B., & Jirka, G. H. (1998). Analysis of reaeration equations using mean multiplicative error. *Journal of Environmental Engineering*, 124(2), 104-110. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1998\)124:2\(104\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:2(104))
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- O'Connor, D. J., & Dobbins, W. E. (1958). Mechanism of reaeration in natural streams. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 123(1), 641-684. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007609>
- Owens, M., Edwards, R. W., & Gibbs, J. W. (1964). Some reaeration studies in streams. *International Journal of Air and Water Pollution*, 8(8-9), 469-486.

- Pazmiño-Rodríguez, J. C., Zambrano-Ganchozo, G. L., & Coello-Burgos, H. A. (2018). Modelización de la calidad del agua del estero Aguas Claras, cantón Quevedo, Ecuador. *Dyna*, 85(204), 45-53. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.65847>
- Pelletier, G. J., Chapra, S. C., & Tao, H. (2006). QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software*, 21(3), 419-425. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.002>
- Porras, L. S. (2004). *Modelación dinámica de la calidad del agua del río de Bogotá Villapinzón* [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Séneca: Repositorio Institucional Uniandes. <https://hdl.handle.net/1992/21814>
- Presidencia de la República de Colombia. (2012). Decreto 1640 de 2012. Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 48.510. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=49987>
- Presidencia de la República de Colombia. (2015). Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diario Oficial No. 49.523. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Ranjith, S., Shivapur, A. V., Shiva Keshava Kumar, P., Hiremath, C. G., & Dhungana, S. (2019). Utilization of water quality modeling and dissolved oxygen control in river Tungabhadra, Karnataka (India). *Open Access Library Journal*, 6, e5397. <https://doi.org/10.4236/oalib.1105397>
- Rathbun, R. E. (1977). Reaeration coefficients of streams—State-of-the-art. *Journal of the Hydraulics Division*, 103(4), 409-424. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004734>
- Raymond, P. A., Zappa, C. J., Butman, D., Bott, T. L., Potter, J., Mulholland, P., Laursen, A. E., McDowell, W. H., & Newbold, D. (2012). Scaling the gas transfer velocity and hydraulic geometry in streams and small rivers. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 2(1), 41-53. <https://doi.org/10.1215/21573689-1597669>
- Rivera Gutiérrez, J. V. (2011). Evaluación de la materia orgánica en el río Frío soportada en el QUAL2K Versión 2.07. *DYNA*, 78(169), 131-139. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/20489>

- Rivera Gutiérrez, J. V. (2016). Determinación de las tasas de oxidación, nitrificación y sedimentación en el proceso de autopurificación de un río de montaña. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(2), 314-326. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000200013>
- Rodríguez-Amezquita, D. (2021). *Implementación del modelo de calidad de agua Qual2k, sobre un tramo del Río Pamplonita, para simulación de escenarios* [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/10983/25529>
- Rodríguez-Jeangros, N., Camacho, L. A., Rodríguez, J. P., & McCray, J. E. (2018). Integrated urban water resources model to improve water quality management in data-limited cities with application to Bogotá, Colombia. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 4(2). <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000846>
- Rojas Serrano, D. A. (2015). *Análisis de transporte de solutos en tramos largos de ríos de montaña - aplicación en el río Teusacá (Tramo Puente Intermedio - La Cabaña)* [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Séneca: Repositorio Institucional Uniandes. <https://hdl.handle.net/1992/21278>
- Sánchez Cárdenas, N. (2015). *Estimación de constantes de desoxigenación carbonácea en el río Teusacá* [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Séneca: Repositorio Institucional Uniandes. <https://hdl.handle.net/1992/17675>
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA). (19 de junio de 2009). Resolución 3956 de 2009, por la cual se establece la norma técnica para el control y manejo de los vertimientos realizados al recurso hídrico en el Distrito Capital. https://www.educacionbogota.edu.co/portal_institucional/sites/default/files/2019-03/Resolucion_Distrital_3956_de_2009.pdf
- Streeter, H. W., & Phelps, E. B. (1925). A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. *U.S. Public Health Service, Public Health Bulletin*, 146, 1-75.
- Thomann, R. V., & Mueller, J. A. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*. Harper & Row.
- Tsivoglou, E. C. (1967). *Tracer measurement of stream reaeration*. Federal Water Pollution Control Administration, U.S. Department of the Interior.

- Tsivoglou, E. C., & Neal, L. A. (1976). Tracer measurement of reaeration: III. Predicting the reaeration capacity of inland streams. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 48(12), 2669-2689. <https://www.jstor.org/stable/25040082>
- Ulseth, A. J., Hall, R. O., Jr., Boix Canadell, M., Madinger, H. L., Niayifar, A., & Battin, T. J. (2019). Distinct air–water gas exchange regimes in low- and high-energy streams. *Nature Geoscience*, 12(4), 259-263. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0324-8>
- United States Army Corps of Engineers (USACE). (2023). *HEC-RAS water quality user's manual, version 6.4.1*. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%20Water%20Quality%20User's%20Manual-v6.4.1.pdf>
- Wang, J., Bombardelli, F. A., & Dong, X. (2021). Physically based scaling models to predict gas transfer velocity in streams and rivers. *Water Resources Research*, 57(3), e2020WR028757. <https://doi.org/10.1029/2020WR028757>
- Wilson, G. T., & MacLeod, N. (1974). A critical appraisal of empirical equations and models for the prediction of the coefficient of reaeration of deoxygenated water. *Water Research*, 8(6), 341-366. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(74\)90048-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(74)90048-7)
- Wu, J., & Yu, X. (2021). Numerical investigation of dissolved oxygen transportation through a coupled SWE and Streeter–Phelps model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 6663696. <https://doi.org/10.1155/2021/6663696>

7. Anexos

Anexo 1

Base de datos bibliográfica para modelación Ka/Kd en Ríos Andinos > 1.500 m.s.n.m.

Año Publicación	Autor(es)	Tipo (Artículo/Libro/Tesis/Norma/Informe)	Aporte principal al estado del arte	Idioma
1924	(Lewis & Whitman, 1924)	Artículo	Teoría de dos películas (two-film theory) para transferencia de gas en la interfaz agua-atmósfera. Base física de los modelos de reaireación. Explica por qué Ka depende del coeficiente de difusividad y del espesor de la capa laminar.	Inglés
1951	(Danckwerts, 1951)	Artículo	Teoría de renovación superficial. Base física de la fórmula de O'Connor & Dobbins (1958). Asume distribución estadística de tiempos de exposición de la interfaz agua-aire.	Inglés
1958	(O'Connor & Dobbins, 1958)	Artículo	Ecuación empírica Ka, la más utilizada en Colombia. Calibrada con ríos de planicie (H: 0.3–9.1 m, U: 0.15–0.49 m/s). Fuera del rango de validez para ríos andinos. Base de QUAL2K.	Inglés
1967	(Tsivoglou, 1967).	Libro	Método del trazador gaseoso para medir Ka directamente en campo (SF ₆ /propano + trazador conservativo). Único método universalmente válido sin restricción de rango hidráulico.	Inglés
1974	(Wilson & MacLeod, 1974)	Artículo	Primera crítica sistemática de las ecuaciones empíricas de Ka. Concluye que NINGUNA ecuación empírica permite predicción confiable fuera de su calibración. Validado posteriormente por Melching & Flores (1999). Argumento histórico clave.	Inglés
1976	(Tsivoglou & Neal, 1976)	Artículo	Extensión del método trazador para predicción de Ka en ríos interiores. Mejor ecuación para ríos de alta energía según Holguín &	Inglés

Año Publicación	Autor(es)	Tipo (Artículo/Libro/Tesis/Norma/Informe)	Aporte principal al estado del arte	Idioma
			Camacho (2003) estudio razonablemente sobre Ka en el río Guavio.	
1977	(Rathbun, 1977)	Artículo	Revisión del estado del arte de los coeficientes de reaireación en ríos. Contexto histórico de las ecuaciones empíricas y métodos de medición directa. USGS Hydraulics Division.	Inglés
1987	(Thomann & Mueller, 1987)	Libro	Referencia clásica de modelación de calidad del agua superficial. Principios matemáticos del balance de masa, transporte advectivo-dispersivo y cinéticas de primer orden para DBO y OD. Complemento de (Chapra, 1997).	Inglés
1987	(Brown & Barnwell, 1987)	Informe	Documentación de QUAL2E y QUAL2E-UNCAS. Antecesor de QUAL2K. Primer modelo ampliamente usado en Colombia. Referencia para entender la evolución histórica de la modelación de calidad del agua en el país.	Inglés
1996	(Melching & Yoon, 1996)	Artículo	Identifica las fuentes de incertidumbre en QUAL2E para el río Passaic (NJ, EE. UU.). Ka y Kd son los parámetros más sensibles. Justifica la necesidad de valores Ka bien calibrados como punto de partida.	Inglés
1997	(Chapra, 1997)	Libro	Marco teórico central del estado del arte. Formaliza el modelo de Streeter-Phelps (Lecturas 19–22), presenta las teorías de transferencia de gas, las ecuaciones empíricas de Ka con sus rangos de validez y las correcciones por temperatura y altitud. Base de QUAL2K.	Inglés
1998	(Moog & Jirka, 1998)	Artículo	Introduce el Error Medio Multiplicativo (EMM) para evaluar ecuaciones de Ka. Demuestra que ecuaciones clásicas fallan en ríos de baja pendiente. Herramienta usada	Inglés

Año Publicación	Autor(es)	Tipo (Artículo/Libro/Tesis/Norma/Informe)	Aporte principal al estado del arte	Idioma
			por Holguín González (2003) para comparar 37 ecuaciones en el río Guavio.	
1999	(Melching & Flores, 1999)	Artículo	Análisis más comprehensivo de ecuaciones de Ka: 371 mediciones con trazador gaseoso en 166 ríos de EE. UU. (USGS). Error estándar > 78% fuera de rango de calibración. Fundamento cuantitativo del vacío para ríos andinos. DOI verificado.	Inglés
1999	(Camacho & Lees, 2019)	Artículo	Modelo MDLC (Multilinear Discrete Lag-Cascade) para transporte en ríos. Base del modelo dinámico QUASAR-MDLC-ADZ usado por Camacho en río Bogotá. Publicado en Journal of Hydrology.	Inglés
2000	(Lees et al., 2000)	Artículo	Relación entre modelos de almacenamiento transitorio y ADZ en ríos. Water Resources Research. Base teórica del modelo de transporte de solutos desarrollado por Camacho para ríos colombianos.	Inglés
2002	(Gualtieri et al., 2002)	Artículo	Análisis dimensional de Ka en ríos. Demuestra que las ecuaciones empíricas son específicas al sistema de calibración. Ka depende de Fr, Re y pendiente relativa — variables ignoradas por O'Connor-Dobbins y Churchill.	Inglés
2003	(Cox, 2003)	Artículo	Revisión de modelos de OD en ríos de planicie. Referencia para comparar QUAL2K, QUASAR, MIKE y otros. Señala limitaciones de modelos en condiciones de alta variabilidad hidráulica.	Inglés
2003	(Holguín González, 2003)	Tesis	DATO CLAVE: Única medición directa de Ka con trazador gaseoso (SF ₆ + rodamina WT) en río andino colombiano (río Guavio, Cundinamarca, ~1.600–2.200 m.s.n.m.). Ka medido = 99–114 día ⁻¹ — 20 a 75× mayor	Español

Año Publicación	Autor(es)	Tipo (Artículo/Libro/Tesis/Norma/Informe)	Aporte principal al estado del arte	Idioma
			que predicciones empíricas clásicas. Solo fórmula de Tsivoglou & Neal aproximó el valor real.	
2004	(Porras, 2004)	Tesis	Modelación dinámica de la calidad del agua río Bogotá — tramo Villapinzón. Implementación QUASAR-MDLC-ADZ con calibración de Ka y Kd. Primer esfuerzo sistemático en cuenca alta río Bogotá (~2.600 m.s.n.m.). Tesis de pregrado, Universidad de los Andes.	Español
2004	(Díaz Merchán, 2004)	Tesis	Modelación calidad del agua interceptor Fucha-Tunjuelo-Canoas (río Bogotá tramo bajo-medio). Extiende el modelo al tramo urbano más crítico. Tesis de maestría, Universidad de los Andes.	Español
2004	(Cañon Zambrano, 2004).	Tesis	Análisis de transporte de solutos en tramos largos del río Teusacá. Calibración de modelos ADZ, ADE y TS con trazadores.	Español
2006	(Pelletier et al., 2006)	Artículo	QUAL2Kw: versión con calibración automática por algoritmo genético. Referencia para la implementación de QUAL2K en Colombia. Incluye módulo de nitrificación, SOD y algas.	Inglés
2007	(Kannel et al., 2007)	Artículo	Aplicación de QUAL2Kw con calibración automática en el río Bagmati (Nepal). Ka y Kd calibrados en condiciones tropicales. Metodología análoga a lo que se propone para ríos andinos colombianos.	Inglés
2008	(Chapra et al., 2008)	Informe	Documentación de QUAL2Kw versión 5.1. Herramienta de calibración automática de QUAL2K. Referencia técnica de la versión más usada en Colombia, con algoritmo genético para ajuste de Ka, Kd y otros parámetros.	Inglés

Año Publicación	Autor(es)	Tipo (Artículo/Libro/Tesis/Norma/Informe)	Aporte principal al estado del arte	Idioma
2009	(Gelda & Auer, 1996)	Artículo	Compilación de tasas, constantes y formulaciones cinéticas para modelación de calidad del agua superficial. Explica los fundamentos y los métodos para modelos de simulación avanzados del transporte de contaminantes en ríos y arroyos	Inglés
2009	(Aristegi et al., 2009)	Artículo	Comparación de métodos para calcular Ka en arroyos del País Vasco (alta pendiente, similar a ríos andinos). Los diferentes métodos producen estimaciones de Ka con diferencias de hasta un orden de magnitud. Solo trazadores producen valores confiables.	Inglés
2009	(SDA, 2009)	Norma	Resolución que establece los Objetivos de Calidad del Agua para el río Bogotá por tramos (cuenca alta, media y baja). Referencia institucional del caso de estudio más avanzado en Colombia. Base legal de la modelación de calidad en la CAR.	Español
2012	(Raymond et al., 2012)	Artículo	Metaanálisis de 563 mediciones directas de Ka en ríos. Demuestra que Ka escala con el producto pendiente $\times$ velocidad ($S \cdot V$), no solo con H y U. Ecuaciones propias más precisas que las clásicas. Justifica la necesidad de incluir pendiente en ríos andinos.	Inglés
2013	(Benedini & Tsakiris, 2013)	Libro	Modelación de calidad del agua para ríos y arroyos. Discute la corrección de saturación de OD por altitud, relevante para ríos andinos >1.500 m.s.n.m. Trata los límites de los modelos en condiciones de alta montaña.	Inglés
2013	(Haider et al., 2013)	Artículo	Evaluación de 29 ecuaciones de Ka en el río Ravi (Pakistán, alta variabilidad de caudal). Identifica las variables más importantes (H	Inglés

Año Publicación	Autor(es)	Tipo (Artículo/Libro/Tesis/Norma/Informe)	Aporte principal al estado del arte	Idioma
			y U) y las ecuaciones más robustas para ríos con régimen variable. Metodología aplicable a ríos andinos bimodales.	
2015	(Presidencia de la República de Colombia, 2015, Decreto 1076)	Norma	Decreto único reglamentario del sector ambiente. Establece el mandato legal de las CAR de fijar Objetivos de Calidad del Agua (OCA) por cuencas, con base en modelos de calidad. Marco normativo de la investigación propuesta.	Español
2015	(Sánchez Cárdenas, 2015)	Tesis	Estimación experimental de K_1 y K_d en río Teusacá (La Calera, ~2.600 m.s.n.m.) mediante pruebas DBO de 20 días. Tres métodos (Thomas, log., dif. log.): $K_1 = 0.12 - 0.30 \text{ día}^{-1}$. Ilustra incertidumbre en estimación de K_d ; K_a obtenido solo de ecuaciones empíricas sin medición directa.	Español
2015	(Rojas Serrano, 2015)	Tesis	Caracterizó hidráulicamente el río Teusacá mediante trazadores de largo alcance en un tramo de 3.100 m, confirmando que la fracción dispersiva (DF) disminuye con la longitud del tramo y se ajusta a los valores típicos de ríos de montaña, e identificó un posible vertimiento no documentado (conjunto Macadamia) que altera las mediciones aguas abajo.	
2017	(Rodríguez-Jeangros et al., 2018)	Artículo	Modelo integrado de recursos hídricos urbanos en Bogotá. Combina QUAL2K con modelo de drenaje urbano. Ilustra la escala del problema de calidad del agua en cuencas andinas colombianas.	Inglés
2018	(Arora & Keshari, 2018)	Artículo	Regresión lineal múltiple (MLR) para estimar K_a con variables hidráulicas y de calidad del agua en ríos urbanos. Confirma velocidad como variable dominante. Alternativa a ecuaciones empíricas clásicas.	Inglés

Año Publicación	Autor(es)	Tipo (Artículo/Libro/Tesis/Norma/Informe)	Aporte principal al estado del arte	Idioma
2019	(Ranjith et al., 2019)	Artículo	Demuestra que la aplicación del modelo QUAL2K permite mejorar la calidad del agua en ríos al optimizar el oxígeno disuelto mediante estrategias como el aumento del flujo, la oxigenación y la reducción de cargas contaminantes, lo cual es clave para la gestión sostenible del recurso hídrico.	Inglés
2019	(Ulseth et al., 2019)	Artículo	Artículo en Nature Geoscience. Descubre DOS regímenes de intercambio gaseoso: difusión turbulenta (ríos de baja pendiente) y mediado por burbujas (ríos de alta pendiente). Los ríos andinos >1.500 m.s.n.m. pertenecen al régimen burbuja — Ka puede ser 10–100× mayor. Explica el dato del río Guavio.	Inglés
2019	(González-Martínez et al., 2019)	Artículo	Evaluación de contaminación potencial de suelos de páramo y aguas en cuenca minera del río Lenguaque (Cundinamarca, ~2.800 m.s.n.m.). Señala la necesidad de modelos con parámetros locales.	Inglés
2020	(Hall & Ulseth, 2020)	Artículo	Revisión comprehensiva del intercambio gaseoso en ríos. Confirma el régimen mediado por burbujas en torrentes de montaña. Describe métodos directos (trazador SF ₆) e indirectos (curva diurna de OD) para medir Ka. Altamente relevante para ríos andinos.	Inglés
2021	(Wang et al., 2021)	Artículo	Modelos físicos para Ka basados en 588 mediciones de campo y 35 ríos modelados con OD. Confirma que solo el 2% de los datos disponibles son de ríos de alta pendiente (>0.02), evidenciando el vacío para ríos andinos.	Inglés

Año Publicación	Autor(es)	Tipo (Artículo/Libro/Tesis/Norma/Informe)	Aporte principal al estado del arte	Idioma
2021	(Chapra et al., 2021)	Artículo	Impacto del calentamiento global sobre la capacidad de asimilación de DBO usando Streeter-Phelps. Demuestra que ríos de alta velocidad (andinos) son los más sensibles. Confirma $\theta_d = 1.047$ y $\theta_a = 1.024$.	Inglés
2021	(Wu & Yu, 2021)	Artículo	Modelo acoplado SWE + Streeter-Phelps para transporte de OD en ríos con cambios de sección (torrentes). Aplicado a ríos de montaña. Demuestra que cambios bruscos en geometría aumentan Ka localmente por zonas de recirculación.	Inglés
2021	(Matovelle, 2021)	Artículo	Estudio más riguroso para río andino latinoamericano: río Yanuncay (Ecuador, ~2.550 m.s.n.m.). Cinéticas Ka y Kd determinadas experimentalmente. RMSE del modelo se reduce >90% con parámetros locales vs. bibliografía. Valida la hipótesis central de la investigación propuesta.	Inglés
2022	(Arora & Keshari, 2022)	Artículo	Modelos de redes neuronales artificiales (ANN) para estimar Ka bajo condiciones hidrodinámicas variables. Demuestra que U es la variable más importante; ANN supera a ecuaciones empíricas clásicas. Herramienta potencial para ríos andinos.	Inglés
2022	(Darji et al., 2022)	Artículo	Revisión de modelos de capacidad asimilativa en ríos (QUAL2Kw, WASP, SWAT, SIMCAT, MIKE-11, CE-QUAL-W2). Contexto comparativo de los modelos usados en Colombia. QUAL2Kw y WASP identificados como los más versátiles.	Inglés

Año Publicación	Autor(es)	Tipo (Artículo/Libro/Tesis/Norma/Informe)	Aporte principal al estado del arte	Idioma
2022	(Mendivil- García et al., 2022)	Artículo	Modelo Streeter-Phelps para resiliencia del río Culiacán (México) ante cambio climático. Metodología de selección de ecuación Ka según rango hidráulico — solo O'Connor-Dobbins aplicable para ese río. Ilustra la importancia de verificar rangos de validez.	Inglés
2023	(Arora & Keshari, 2023)	Artículo	Redes neuronales difusas adaptativas (ANFIS) para modelar Ka bajo condiciones variables. Dataset de 5 años río Yamuna (India). $R^2 = 0.92$ vs. ecuaciones empíricas. Enfoque de IA aplicable a calibración de Ka en ríos andinos.	Inglés
2025	(Al-Saadi & Al-Zubaidi, 2025)	Artículo	Técnica integrada numérica para seleccionar la ecuación Ka más apropiada para un cuerpo de agua específico. Demuestra que usar la ecuación equivocada produce errores de DO >50%. Metodología aplicable a la validación de Ka en ríos andinos.	Inglés