



ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN DE LOS CURSOS DE AGUA INTERIORES DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS.

Docente:

Ing. Fernando Carlos Raffo.

Autor:

Ing. Facundo Atuel Retamal.

Especialización en Ingeniería
Ambiental.

Febrero de 2016.

Trabajo
Integrador.

ÍNDICE.

1.- Introducción.....	Pág. 2
2.- Diagnóstico.....	Pág. 3
3.- Problema.....	Pág. 4
4.- Objetivos.....	Pág. 6
4.1.- Objetivos Generales.....	Pág. 6
4.2.- Objetivos Particulares.....	Pág. 6
5.- Antecedentes.....	Pág. 7
6.- Alternativas.....	Pág. 12
6.1.- Análisis de los componentes hidráulicos.....	Pág. 18
6.2.- Elección de alternativa.....	Pág. 19
7.-Desarrollo.....	Pág. 21
7.1.- Ubicación y caracterización del área en estudio.....	Pág. 21
7.2.- Caracterización del curso de agua en estudio.....	Pág. 22
7.3.- Caracterización de las descargas.....	Pág. 22
7.4.- Muestreo y caracterización in situ del curso de agua en estudio.....	Pág. 24
7.5.- Muestreo y caracterización in situ de las descargas antrópicas.....	Pág. 25
7.6.- Estimación de caudales mínimos.....	Pág. 26
7.6.1.- Regionalización de caudales.....	Pág. 27
7.6.2.- Tipos de regionalización.....	Pág. 28
7.6.3.- Criterio para la regionalización de caudales.....	Pág. 29
7.7.- Aplicación del modelo matemático.....	Pág. 33
7.7.1.- Condiciones generales de modelación.....	Pág. 33
7.7.2.- Calibración del modelo matemático.....	Pág. 35
7.7.3.- Explotación del modelo matemático en diferentes condiciones de caudal.....	Pág. 36
7.8.- Desarrollo de un programa de monitoreo continuo.....	Pág. 37
7.9.- Conclusiones y recomendaciones para el curso de agua en estudio.....	Pág. 38
8.- Conclusión.....	Pág. 39
9.- Bibliografía.....	Pág. 41

1.- Introducción.

Mi nombre es Facundo Atuel Retamal, soy ingeniero civil, egresado de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la UTN, me desempeñé en el mercado laboral, en diversas áreas de la ingeniería civil, tanto en el ámbito público como en el privado.

Actualmente, desempeño dos actividades ingenieriles principales: una como miembro de un estudio de arquitectura e ingeniería, dedicado al mercado privado. En el mismo realizamos todo tipo de obras de arquitectura, Proyectos Ejecutivos, Legajos Técnicos, presentaciones Municipales, Dirección de Obra, Representación Técnica y Construcción, entre otras tareas del rubro, incluyendo trabajos de reformas, obra nueva modalidad llave en mano y otras relacionadas.

La otra área de la ingeniería en la que me desempeñé, es la ingeniería ambiental, desde que en el año 2.009 comencé a desempeñar funciones en la Secretaría de Ambiente de la Provincia de Entre Ríos, Área de Gestión Región Río Uruguay.

En este organismo, me desempeñé como Asesor Técnico dentro del Área Industrias, la cual es la encargada de procurar y alentar el cumplimiento de la Ley Provincial N° 6260 “de prevención de la contaminación por parte de las industrias” y sus Decretos Reglamentarios 5837/91 y 5394/97.

Además de esta tarea principal, desarrollo otras actividades, como son el asesoramiento técnico a otras áreas, en temas relacionados a la ingeniería ambiental, tareas administrativas y legales, como así también de atención personal, tanto a profesionales, empresarios y público en general, que así lo requieran.

Las inspecciones a industrias, emprendimientos productivos de diversos tipos, atención de denuncias, son también, otro aspecto importante del trabajo diario.

La mencionada Ley Provincial N° 6.260, entre otros aspectos, regula el vertido de efluentes industriales en la Provincia de Entre Ríos, fijando parámetros para la

disposición final de efluentes industriales, líquidos, gaseosos y sólidos, como así también, incorporando ruidos y vibraciones.

Dentro de los parámetros fisicoquímicos que regulan los vuelcos de efluentes líquidos, uno de los más relevantes, es el de la Demanda Bioquímica de Oxígeno o DBO, cuya definición se realizará más adelante en este trabajo. El Decreto Reglamentario 5837/91 declara que, determinadas situaciones, su valor permitido deberá ser determinado por la autoridad de aplicación del mismo.

El trabajo a desarrollar a continuación, como evaluación globalizadora final de la Especialización y Maestría en Ingeniería Ambiental dictada en la FRCU de la UTN, aborda el problema de encontrar un método que pudiera recomendarse, sin que sea el único plausible de ser utilizado, como medio para determinar y fundamentar el parámetro de DBO aplicable a cada caso que se desee evaluar en el medio real de aplicación del cuerpo normativo.

2.- Diagnóstico.

La reglamentación mencionada, a pesar de haber sido muy correcta en relación a las herramientas legales de otras provincias de nuestro país y de haberse sancionado y reglamentado en tiempos en que muchas provincias carecían completamente de este tipo de herramientas para la protección del ambiente, lo cual tienen su mérito y debe destacarse, adolece de muchas falencias. Producto, muchas de ellas, de la falta de un conocimiento más generalizado del aspecto ambiental, la cual es una disciplina que ha sido abordada hace relativamente muy poco tiempo por la humanidad en su totalidad.

A pesar de estas falencias u omisiones, el cuerpo legal demuestra gran robustez en cuanto a su fundamentación científica, dejando lugar a que los técnicos que la apliquen puedan lograr ampliaciones y especificaciones en cualquier aspecto que lo consideren necesario. Ejemplo de ello, es que este cuerpo legal, en sus valores permitidos para

Demanda Bioquímica de Oxígeno, fija valores de vuelco para cursos permanentes, como son el Río Uruguay, el Río Paraná y los cursos interiores de la provincia, con curso permanente con un caudal igual o mayor a 10 veces el caudal de efluente líquido volcado, dejando la siguiente aclaración para los que no entran en esta clasificación, en el apartado 21.4 del Anexo 1 del Decreto Reglamentario 5837/91: *“Las descargas a cursos de agua no permanentes, o con un caudal inferior a 10 veces el caudal de la descarga industrial, estarán sujetas a un estudio particular para cada caso.”*

3.- Problema.

Luego de toparme con la situación descripta, comencé a profundizar en el tema, estudiando los distintos aspectos que deben ser tenidos en cuenta para tomar una decisión respecto al parámetro de DBO de un efluente líquido.

El problema consiste en la obtención de valores numéricos que puedan ser aplicados a estudios realizados al efluente líquido de cualquier industria que permita garantizar la protección del medio receptor del mismo, englobando todos los aspectos que esto conlleva. Para que, de esta forma, se puedan obtener valores cuantificables y de determinación posible que permitan regular y monitorear si un establecimiento industrial está impactando de manera significativa el medio del cual se nutre para funcionar.

El parámetro a estudiar, como ya se dijo, es la Demanda Bioquímica de Oxígeno o DBO, la cual consiste en la cantidad de oxígeno que los microorganismos encargados de oxidar y reducir la materia orgánica, necesitan consumir para generar este proceso “naturalmente” en un cuerpo de agua. De esta forma, se puede medir, de manera indirecta, la cantidad de materia orgánica biodegradable que contiene el líquido en estudio.

La importancia de este parámetro es superlativa en cualquier estudio de la calidad de agua de un curso fluvial, por diversos motivos. En primer lugar, por la materia

orgánica en sí misma como contaminante, pero también por las implicancias que su presencia conlleva para la preservación de las características de cualquier ambiente. De esta forma, una cantidad sobre elevada de la misma, conlleva a modificaciones significativas en cualquier medio natural, entre las cuales se puede considerar, quizás como la de mayor preponderancia, su afectación a la vida acuática, en todas sus formas, debido a que grandes cantidades de materia orgánica en un curso de agua, generará la proliferación de microorganismos que se nutrirán de la misma, empleando en el proceso, el oxígeno presente en el cuerpo de agua. De esta forma, si la DBO es muy alta, y supera la capacidad de autodepuración del curso de agua, estos microorganismos consumirán el oxígeno disuelto en el mismo, tornando imposible el mantenimiento de la vida acuática, lo cual aumentará aún más el problema, generando un círculo vicioso de problemas ambientales.

Por lo dicho, el estudio necesario para la determinación del parámetro de la DBO que debe volcar una industria en un curso de agua, se puede determinar a través del estudio de la capacidad de autodepuración de un curso de agua.

Este tipo de trabajos se clasifican como investigaciones de tipo aplicada y el objeto de estudio será, en cada caso, el curso de agua abordado.

4.- Objetivos.

Se enumeran a continuación los objetivos del presente trabajo.

4.1.- Objetivo general.

Generar un procedimiento que sienta las bases para estudios tendientes a determinar la capacidad de autodepuración de los cursos de agua interiores de la provincia de Entre Ríos, atendiendo a caracterizar a los mismos en función de las diferentes actividades

antrópicas que los afectan, ya sean primarias, industriales y/o de servicio, así como también los vertidos de efluentes cloacales y todo otro de relevancia, para, de esta forma, lograr un correcto entendimiento del funcionamiento real de cada curso de agua y lograr un mejor aprovechamiento y protección del recurso.

4.2.- Objetivos específicos.

- Realizar una investigación exploratoria de datos y antecedentes relacionados al tema en estudio.
- Determinar las posibles alternativas para abordar el problema.
- Elegir y estudiar la estrategia más adecuada para la resolución.
- Desarrollar un método que permita sistematizar los estudios de los cursos de agua interiores de la Provincia de Entre Ríos, para la gestión de los vertidos de efluentes líquidos desde descargas puntuales a los mismos.

5.- Antecedentes.

En la Provincia de Entre Ríos, más específicamente en la Facultad regional Concepción del Uruguay de la UTN, se desarrolla un grupo de investigación denominado GECRU - Grupo de Estudio de la Contaminación del Río Uruguay, que entre sus principales líneas de investigación, se realizan estudios de cursos de agua de la forma descrita anteriormente. Con la finalidad buscada, de determinación de la capacidad de auto depuración de cursos de agua en estudio, entre otros estudios fundamentados en la premisa del estudio de la contaminación de los mismos.

Entre sus trabajos, se pueden citar como antecedentes, para el trabajo en desarrollo, los estudios realizados sobre los Arroyos el Cura y El Pelado, ambos ubicados en la provincia de Entre Ríos, el primero en el departamento Gualeguaychú y el otro en el departamento Colón.

El primero de los trabajos comentados se tituló: “Elaboración de una Línea de Base del Estado de la Contaminación del Agua en el Arroyo El Pelado. Departamento Colón. Provincia de Entre Ríos”.

El segundo de los trabajos, se tituló: “Elaboración de una Línea de Base del Estado de la Contaminación del Agua en el Arroyo El Cura. Departamento Gualeguaychú. Provincia de Entre Ríos”.

En estos trabajos, el Grupo de Investigación estudió la capacidad de autodepuración de los cursos de agua correspondientes, a través de la calibración del modelo matemático Qual2K, generado por la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU, el cual es una herramienta de libre acceso al público y de uso muy difundido en todo el mundo, lo cual le brinda una solidez de importancia. En el apartado correspondiente se desarrollará más en profundidad las características de este modelo, de suma importancia en el medio para estudios que pueden generar una respuesta el problema general planteado.

Otros trabajos de este Grupo de Investigación se enumeran a continuación:

- Estudio de las características hidrodinámicas, sedimentológicas y morfológicas del Río Uruguay, orientado al mejoramiento de sus condiciones de navegabilidad.
- Estudio de la contaminación del Río Uruguay.
- Estudio de la evolución espacio-temporal de indicadores químicos y bacteriológicos de la calidad de aguas en un tramo del Río Uruguay.
- Manejo sostenible de las cuencas del Río Gualeguaychú y Río Uruguay. Contaminación y calidad de aguas.
- Etapa: estudio de acciones para la mejora de la calidad del agua del Río Uruguay y otros.

- Estudio de la cuenca del Río Uruguay – Etapa: estudio de acciones para la mejora de la calidad del agua del Río Uruguay y otros cursos entrerrianos.

Además de los trabajos mencionados, de suma importancia por tratarse de desarrollos de una facultad de la zona, sobre trabajos de una de las cuencas que regula la Ley 6260, dentro de su marco de aplicación en la provincia de Entre Ríos, se pueden encontrar trabajos de similares características procedentes de distintas partes de Latinoamérica y el mundo. Ejemplo de ello, son los trabajos enumerados a continuación.

- Modelación integrada de cantidad y calidad de agua en la cuenca del Río Araguari, Brasil. - Marcio Ricardo Salla, Javier Paredes - Arquiola, Abel Solera, Joaquín Andreu Álvarez, Carlos Eugênio Pereira, José Eduardo Alamy Filho & André Luiz De Oliveira - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia España.

En este trabajo, se analiza la cuenca del río Araguari, la cual tiene un enorme potencial de recursos hídricos. Sin embargo, la población y crecimiento industrial han generado numerosos conflictos de interés, privados y colectivos, en los usos múltiples del agua, dando lugar a la necesidad de una gestión integrada de la cantidad y calidad del agua a nivel de la cuenca. En este estudio se utilizó el Sistema de Soporte de Decisión AQUATOOL. El balance hídrico realizado por el módulo SIMGES, para el período de octubre 2006 a septiembre 2011 proporcionó una buena representación de la realidad de esta cuenca. Los parámetros estudiados fueron el oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno orgánico, amonio, nitrato y fósforo total. Los coeficientes de las reacciones bioquímicas, tasas de sedimentación y demanda de oxígeno disuelto del sedimento para este período fueron calibrados y validados en la modelación de calidad del agua, mediante el

módulo GESCAL. Resumidamente, los resultados más importantes obtenidos pueden enumerarse de la siguiente forma: el análisis de sensibilidad indica que los coeficientes de degradación de la materia orgánica, nitrificación, temperatura del agua y demanda de oxígeno del sedimento interfirieron más significativamente en las variables de estado. Para evitar la eutrofización en el embalse de Ponte Nova y en el resto de los embalses en cascada, el Comité Local de la Cuenca del Río debería adoptar medidas restrictivas contra el uso de fertilizantes agrícolas. Por otra parte, en la subcuenca del Río Uberabinha, nuevas alternativas para el suministro público de agua a la ciudad de Uberlandia y mejoras en la eficiencia del tratamiento de la principal Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) deben ser considerados, ya que la demanda bioquímica de oxígeno, amonio y fósforo total no han cumplido con los requisitos de la COPAM (2008) en los meses con más sequías.

- Modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó. - Lino Valcárcel Rojas, Jorge Borroto Portela, Nancy Alberro Macías, José Griffith Martínez, Milagros Derivet Zarzabal, Pedro Flores Juan, Jaime Cuesta Borges, Maydel Rodríguez González, Zahilys Herrero, Anel Rodríguez Garcez, Judith Domínguez Catusus. - Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) Calle 30, No 502 e/ 5ta y 7ma, Miramar, Ciudad de La Habana, Cuba; Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC); Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras (ICINAZ).

En este trabajo, se presentó la metodología seguida para la modelación de tres parámetros que caracterizan la calidad del agua: demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto y amonio en un tramo del río Luyanó, empleando el software RIOSep® v.2.0. Durante el trabajo se combinaron acertadamente las técnicas de radiotrazadores para estimar los parámetros hidrodinámicos

de la corriente del río con las técnicas de análisis fisicoquímico para determinar sus parámetros básicos. El levantamiento de los parámetros hidrodinámicos en la corriente se realizó con el empleo del ^{99m}Tc . Simultáneamente con la determinación de caudales se muestreó en cinco estaciones en el cauce principal y dos tributarios, para determinar los parámetros físico-químicos de interés. Como resultado se obtuvo un modelo que describe en más del 90% el comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno y del oxígeno disuelto y en más del 65% el comportamiento del amonio, por lo que caracteriza adecuadamente los procesos de autodepuración y el balance de oxígeno en las aguas del río.

- Modelación de la calidad del agua del río Tula, Estado de Hidalgo, México. – Rosalba Montelongo Casanova, Alberto José Gordillo Martínez, Elena María Otazo Sánchez, José Roberto Villagómez Ibarra, Otilio Arturo Acevedo Sandoval, Francisco Prieto García.

Modelar la calidad del agua del río Tula, desde el emisor central hasta su confluencia con la presa Endhó, ha sido el objetivo central de este trabajo. Se evaluó durante dos años, considerando una longitud de 50 km en 4 zonas y 35 sitios de muestreo. La mayor cantidad de materia orgánica la aporta el emisor central, agua sin tratamiento de la Ciudad de México y zona conurbana. Los valores de DBO variaron desde 1.16 hasta 486.81 mg O₂/L; el oxígeno disuelto entre 1.52 y 5.82 mg/L, esto implica afectación para el desarrollo de la vida acuática. La alcalinidad rebasó el criterio ecológico de calidad como fuente de agua potable con valor de 458.01 mg/L. Las grasas presentaron variaciones desde 0.9 mg/L hasta 18.1 mg/L y el nitrógeno amoniacal fuera de los límites establecidos para protección de la vida acuática con valores desde 0.09 a 64 mg/L; los nitratos (6.24 mg/L) y nitritos (0.5-1.304

mg/L) rebasan el criterio ecológico. Los metales cadmio, plomo, hierro, manganeso y zinc están en concentraciones por encima de lo permisible en y en algunos tramos se reportó presencia de mercurio. Los coniformes fecales fueron detectados en valores desde 2.1×10^4 hasta 2.40×10^{11} NMP/100 ml. En general la toxicidad en las descargas de aguas residuales demostró que todas se presentan de moderada a alta. Solamente tres estaciones de monitoreo (19 %) con excelente calidad, DBO5 menores o iguales a 3 mg/L, lo que se considera como agua no contaminada por materia orgánica biodegradable.

6.- Alternativas.

A tal efecto se han realizado muchos estudios e investigaciones científicas, que han logrado generar modelos matemáticos que permiten abordar el problema, realizando una descripción físico – matemática del problema, de tal manera que es posible predecir la evolución espacio temporal de contaminantes vertidos en cursos de agua, que permiten inferir criterios de calidad exigibles a los vuelcos, de manera de no afectar los distintos usos que pudiera pretenderse no afectar para los distintos cursos de agua en estudio.

Los modelos matemáticos utilizados son muy variados, pudiéndose encontrar, entre los más sencillos, los constituidos por ecuaciones generadas como resultado de la resolución de las ecuaciones diferenciales de Conservación de la Masa o de Continuidad y de Conservación de la Cantidad de Movimiento o de Navier – Stokes, aplicando condiciones de contorno adecuadas para cada caso.

También se encuentran modelos que relacionas las variables más “cercanas” en cuanto a los parámetros de calidad de agua, como puede ser el Modelo de Streeter – Phelps, que se puede utilizar para determinar la evolución del Oxígeno Disuelto en un

curso de agua, como así también la de la DBO, y la determinación de los puntos mínimos y máximos de éstos dos parámetros respectivamente, lo cual es fundamental, para el mantenimiento de las características mínimas de conservación de la vida acuática.

Agregando mayor cantidad de procesos fisicoquímicos, a través de otras expresiones matemáticas e interrelacionando unos con otros se generan modelos cada vez más avanzados, los cuales pueden desarrollarse, en una, dos o tres, dimensiones, dependiendo de los recursos disponibles y de las características del curso de agua y del estudio a realizar.

Hoy en día, con el advenimiento de la computación, se han logrado modelos increíblemente precisos y sofisticados, ejemplos de los cuales pueden ser el unidimensional QUAL2K, de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA, por sus siglas en inglés), el bidimensional HEC-RAS, generado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EEUU, y el tridimensional MIKE 21, entre otros.

Para el trabajo en cuestión se toman ciertas premisas que deben cumplir los modelos antes de ser incluidos entre las alternativas a considerar. La primera y quizás, la más importante, es que los modelos a considerar deben contar con reconocimiento a nivel mundial y su funcionamiento y resultados deben encontrarse probados ampliamente en el campo de estudio, siendo referencia del tipo de estudio. Es decir, los modelos a emplear deben ser irrefutables.

Por otra parte, para el tipo de recomendación buscada, se cree conveniente que los modelos a evaluar sean de acceso libre y gratuito por parte de los usuarios. Este aspecto es fundamental, dado que el tipo de estudio debe ser aplicado a actores con disponibilidad de recursos muy disímiles uno de otro y este método o recomendación tiene la intención de ser universal, tanto por parte de las partes directamente involucradas, generadoras de vuelcos en los cursos de agua, como así también, por

cualquier otro actor que requiera controlar, validar o corroborar los datos obtenidos por los anteriores.

Con estas 2 pautas planteadas, la elección de un modelo matemático acorde a las necesidades planteadas se acota en gran medida. Existen, en el medio, pocos modelos que las cumplen simultáneamente, uno es el QUAL2K, desarrollado por Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. en el marco de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA), y otro, el HEC RAS, desarrollado por el Centro Hidrológico de Ingenieros del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EEUU.

El modelo QUAL2K (Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H., 2007) permite simular cualquier ramificación de un sistema fluvial unidimensional. Su utilización necesita, previamente, una formulación idealizada del sistema hidrográfico a estudiar, dividiéndolo en tramos, los cuales son sectores del río que tienen características hidráulicas uniformes, que a su vez se dividen en elementos de cálculo de igual longitud.

Para cada uno de los elementos de cálculo, el balance de masa, se escribe en términos de flujo entrante en la cara de aguas arriba, descargas externas (fuentes) o extracciones (sumideros) y el flujo saliente a través de la cara de aguas abajo del elemento.

De igual manera se efectúa un balance de masa para todo constituyente que transporte el río. En el balance de masa se considera, tanto el transporte y la dispersión longitudinal, como el movimiento de masa a lo largo de la corriente. La masa puede ser aumentada o removida del sistema, por fuentes o sumideros externos e internos tal como fuentes bénticas y transformación biológica.

Cada elemento de cálculo se considera totalmente mezclado. De esta manera la corriente de agua puede conceptualizarse como una hilera de reactores completamente

mezclados (elementos de cálculo), que están vinculados secuencialmente a los mecanismos de transporte y dispersión.

QUAL2K ha sido ampliamente usado como una herramienta de planificación en el aspecto de calidad de aguas de una corriente de agua, puede usarse para estudiar el impacto de vertidos contaminantes sobre la calidad de agua de un cauce, o identificar la magnitud y características de calidad de descargas puntuales de aguas contaminadas como parte de un programa de muestreo de campo.

Se basa en la ecuación de transporte de masa de advección - dispersión unidimensional, que es numéricamente integrada, en el espacio y tiempo, para cada constituyente de calidad de agua. Esta ecuación incluye los efectos de advección, dispersión, dilución, reacción e interacción de constituyentes, y, fuentes y sumideros y se resuelve a través de un programa codificado en Fortran. Para esas simulaciones se utiliza la planilla de cálculo Microsoft Excel (Windows) como la interface gráfica del software.

El modelo Qual2K, desarrollado originalmente por Chapra, S. C. de la Universidad de Tufts, es una versión mejorada del modelo QUAL2E. Su estructura de funcionamiento parte de los siguientes presupuestos:

- Modelo Unidimensional: El canal está bien mezclado vertical y lateralmente.
- Flujo Constante: Se simula un flujo constante no uniforme.
- El balance diario de calor: El balance de calor y temperatura son simulados en función de la meteorología a escala diaria.
- Todas las variables de calidad de agua también son simuladas en una escala de tiempo diaria.
- Se simulan entradas (puntuales y no puntuales) y salidas de los componentes modelados.

- El modelo segmenta el cuerpo de agua en tramos igualmente espaciados. Las cargas múltiples y las salidas pueden insertarse en cualquier segmento.
- En la representación del carbono orgánico se efectúa la distinción entre demanda bioquímica de oxígeno de oxidación lenta (DBO lenta) y una oxidación rápida (DBO rápida).
- Ambientes anóxicos: El Qual2K engloba situaciones anóxicas reduciendo las reacciones de oxidación a cero en niveles bajos de oxígeno. Además de eso, la desnitrificación se modela como una reacción de primer orden que ocurre en concentraciones de oxígeno bajas.
- Algas inferiores: El modelo simula directamente el agrupamiento de algas inferiores. Estas algas tienen una estequiometría variable de N y de P.
- Reducción de la luz. La reducción de la luz se calcula en función del fitoplancton, de los detritos, y de los sólidos inorgánicos.
- pH: La alcalinidad y el carbono inorgánico total son simulados, siendo el pH del río simulado en base de estas dos cantidades.
- Patógenos: Se simula un patógeno genérico. La remoción del patógeno se determina en función de la temperatura, de la luz, y de la sedimentación.

Por otra parte, el modelo HEC RAS (Hydrological Engineering Center - River Analysis System) es un programa de modelización hidráulica unidimensional compuesto por 4 tipos de análisis en ríos:

Modelización de flujo en régimen permanente.

Modelización de flujo en régimen no permanente.

Modelización del transporte de sedimentos.

Análisis de calidad de aguas.

Nos permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua por lo que su objetivo principal es realizar estudios de inundabilidad y determinar las zonas inundables.

El HEC RAS es un sistema integrado de software, diseñado para un uso en tareas múltiples. Está compuesto de una interface gráfica para el usuario (GUI), separando los componentes del análisis hidráulico, almacenaje de datos y capacidad de administración, de gráficas y facilidad en el manejo de la información.

El sistema HEC RAS contiene fundamentalmente, cuatro componentes de análisis hidráulico unidimensional, para: flujo permanente en el cálculo del perfil de la superficie, simulación de flujo no permanente, cálculo de transporte de sedimentos, y análisis de calidad de agua. Esta última característica, fue incorporada recientemente. Un elemento clave es que en los tres componentes pueden usarse datos geométricos representativos comunes, rutinas geométricas comunes y, cálculo de rutinas hidráulicas.

El usuario interactúa con el sistema a través de una interface gráfica (Graphical User Interface, GUI). El objeto principal en el diseño de la interface fue hacer más fácil el uso del software con lo cual se obtiene un alto nivel de eficiencia por parte del usuario, la interface esta provista de las siguientes funciones:

Administración de archivos

Entrada y edición de datos.

Análisis hidráulicos.

Despliegado de tablas y gráficas de datos de entrada y de salida.

Facilidad de reportes.

Ayuda en línea.

6.1.- Análisis de los componentes hidráulicos.

Perfil de la superficie del agua para flujo permanente: este componente del modelaje del sistema realiza los cálculos de los perfiles de la superficie del agua para un flujo gradualmente variado. El sistema puede manejar una gran red de canales, un sistema dentrítico, o simplemente la corriente de un río. Se pueden realizar modelajes para régimen subcrítico, supercrítico, y para un régimen de flujo mixto para los perfiles de la superficie del agua.

El procedimiento de cómputo básico está basado en la solución de la ecuación unidimensional de la energía. Las pérdidas de energía son evaluadas mediante la fricción (Ecuación de Manning) y las contracciones/expansiones (coeficiente multiplicado por el cambio en la carga de velocidad). La ecuación del momentum es utilizada en las situaciones donde el perfil de la superficie del agua es rápidamente variado. Estas situaciones incluyen los cálculos para el régimen de los perfiles en las confluencias de los ríos (unión de corrientes).

Los efectos de varias obstrucciones tales como puentes, alcantarillas, vertederos y estructuras en el cauce pueden ser considerados en los cálculos. El sistema de flujo permanente está diseñado para aplicaciones en la dirección de los cauces y los estudios de la seguridad del flujo para evaluar obstrucciones en el cauce. Así mismo, hay capacidad disponible para estimar el cambio en el perfil de la superficie del agua debido a mejoras en los canales y diques.

Simulación del Flujo no permanente: esta componente del sistema en el modelaje del HEC-RAS será capaz de simular el flujo no permanente unidimensional a través de una red completa de canales abiertos, la solución de la ecuación de flujo no permanente ha sido adaptada del modelo UNET del DR. Robert L Barkau (Barkau, 1992 y HEC, 1993). Los componentes del flujo no permanente fueron desarrollados principalmente para cálculos de régimen subcrítico.

Los cálculos hidráulicos para las secciones transversales, puentes, alcantarillas, y otras estructuras hidráulicas que fueron desarrolladas para el flujo permanente serán incluidas en el módulo de flujo no permanente, adicionalmente, la componente del flujo no permanente tendrá la capacidad de modelar áreas de almacenaje o almacenamientos, presas navegables, túneles, estaciones de bombeo y diques deteriorados.

Transporte de sedimentos/ cálculo del cauce: esta componente del sistema de modelaje está destinada para la simulación unidimensional del transporte de sedimentos / cálculos del ensanchamiento o reducción resultante de la socavación y depósito en períodos de tiempo moderados (típicamente años, aunque se puede aplicar a inundaciones y otros eventos).

El transporte de sedimentos se calcula para una fracción del tamaño de partículas. Se incluyen más características, como la capacidad para modelar una red completa de corriente, dragado de canales, algunos diques y otras alternativas, y el uso de algunas ecuaciones diferentes para el cálculo del transporte de sedimentos.

6.2.- Elección de alternativa.

Para el análisis y comparación de las alternativas planteadas se propone una escala numérica, con un valor mínimo de 1, y un máximo de 5. El primero corresponde al valor menos favorable y el segundo, al más favorable, en cada aspecto considerado. Por ende la alternativa que sume un valor total mayor será la mejor alternativa entre las opciones consideradas para el abordaje del problema.

Se evaluarán los siguientes aspectos:

Técnico: considera el conocimiento previo necesario para aplicar cada modelo. Cuanto menor es el valor, se requiere más conocimiento.

Metodológico: considera la complejidad de implementación del modelo. Cuanto menor es el valor, menos complejo será el mismo.

Ambiental: Considera el beneficio ambiental de la aplicación de uno u otro modelo.

Económico: Considera el costo de la aplicación de cada modelo. Si bien ambos son modelos libres, el proceso de implementación de cada uno, por sus diferentes características, conllevan a una variabilidad de costos entre cada uno.

Aplicabilidad: considera la dificultad de aplicación de cada modelo, en función de los requerimientos operativos de cada uno y los recursos necesarios.

Efectividad: considera la capacidad para realizar adecuadamente la función de modelado del curso de agua en estudio por parte de cada modelo.

A Continuación, en la figura número 1, se observa la matriz de comparación de alternativas.

Modelo	Aspectos evaluados						Total
	Técnico	Metodológico	Ambiental	Económico	Aplicabilidad	Efectividad	
QUAL2K	3	3	4	4	4	4	22
HEC-RAS	1	2	5	2	2	5	17

Figura Nro. 1.- Matriz de comparación de alternativas.

Del estudio realizado se desprende que, conforme a las consideraciones evaluadas, el modelo Qual2K de la EPA es el más adecuado para el trabajo planteado.

7.- Desarrollo.

A continuación, se desarrolla el método de realización del estudio para abordar el problema planteado.

7.1.- Ubicación y caracterización del área en estudio.

En primer lugar se debe determinar el área de interés para el estudio y realizar una caracterización detallada de la misma. La misma corresponderá, en cada caso, al área de influencia del curso de agua en estudio. En algunos casos, podría tratarse de la cuenca de aporte del mismo, o de porciones de dichas cuencas. Los límites deberán determinarse con criterio profesional en función de las determinaciones de relevancia a desarrollar.

En esta etapa se debe recopilar toda la información disponible, con la finalidad volcar todos los datos de relevancia, en aspectos geográficos, geomorfológicos, como son la ubicación de cada tramo del curso, su longitud, los nombres de los diferentes tramos, cursos de agua afluentes y efluentes al mismo, superficie de la cuenca, de precipitaciones, etc.

Para ello, es posible valerse de diferentes herramientas y bases de datos. Las imágenes satelitales, sistemas SIG, cartas topográficas, mapas planos y similares serán indispensables para la caracterización y representación geográfica del sitio en estudio.

Respecto de los datos específicos, hidrológicos y similares de la zona en caracterización, es posible recurrir a bases de datos de referencia, como son las de distintos organismos e instituciones. La Comisión Administradora del Río Uruguay (C.A.R.U.), la Prefectura Naval Argentina, los distintos Municipios, la Dirección de Hidráulica de la Provincia, la Subsecretaría de Recursos Hídricos, la Secretaría de Ambiente de la Provincia de Entre Ríos, entre otros, son ejemplos de estos organismos.

Todos estos datos recopilados deberán ser incluidos en el correspondiente informe técnico del trabajo realizado. Según su naturaleza, algunos datos deberán formar parte del cuerpo del trabajo, así como también podrán agregarse otros en el anexo, sobre todos los correspondientes a tablas y datos en bruto, sin procesamiento por parte del autor del trabajo.

7.2.- Caracterización de curso de agua en estudio.

Esta etapa es similar a la anterior, en cuanto al tipo de información a recopilar y a volcar en el apartado, pero debe referirse específicamente al curso de agua, no ya a la zona de influencia, sino a datos hidrológicos, hidráulicos, geológicos, etc.

Se deben atender también todos los cursos de agua afluentes y efluentes del curso principal en estudio, que revistan relevancia para el trabajo en desarrollo.

En particular, a los datos de relevancia mencionados en el apartado anterior, pueden sumarse, como indispensables, los registros de mediciones de altura del pelo de agua, de caudales, secciones del cauce, y toda otra información específica, de la que pudiera disponerse.

7.3.- Caracterización de las descargas.

Se deben caracterizar detalladamente las descargas presentes en el curso de agua en estudio. Los parámetros físico químicos y microbiológicos de relevancia para el estudio realizado variarán en cada caso, pero en general, deberán referirse a la legislación local. Alternativamente, en los casos en que sea conveniente y/o necesario podrá recurrirse a otros parámetros de normativas aceptadas en el medio local e internacional.

En este método, en particular se estudiarán las fuentes de vertido puntuales, como pueden ser afluentes cloacales, industriales, etc., aunque también podría atenderse a las descargas difusas, como pueden ser las generadas por el arrastre de productos utilizados en agricultura por parte del agua de lluvia en grandes extensiones de campos.

Es importante no dejar de mencionar los procesos antropogénicos, ya sean industriales o de cualquier tipo, que dan lugar a la descarga a caracterizar. Como así también a los sistemas de tratamiento, en caso de que lo hubiere en cada caso, su

justificación y nociones básicas de funcionamiento, su estado actual, entre otros aspectos a destacar.

Otros datos de suma importancia son los caudales de las descargas, su variabilidad temporal, así como también la ubicación exacta de las mismas en relación con el desarrollo del curso de agua en estudio.

Lo dicho es aplicable a descargas presentes existentes al momento de realización del estudio, pero adicionalmente, puede ser de interés para determinados casos, evaluar los efectos de una descarga futura. Este sería el típico caso de evaluación de factibilidad de instalación de una nueva industria, que descargará sus efluentes a un curso interior de la provincia, por ejemplo.

En estos casos, es cuando cobra mayor relevancia los estudios y análisis de procesos y de los sistemas de tratamiento de efluentes líquidos, ya que se deberá tener una idea de las posibilidades a alcanzar en cuanto a los parámetros de vertido en cada caso. De esta forma, con los parámetros de vertido esperado, se pueden estudiar y evaluar los efectos de las futuras descargas.

Alternativamente, puede utilizarse el proceso como herramienta para la determinación de los parámetros a cumplir por las descargas, de manera de que no alteren las condiciones naturales del curso de agua en cuestión. Para ello, también debe recurrirse a legislación que fije los parámetros de calidad de agua en función de los distintos usos del agua previstos.

7.4.- Muestreos y caracterización in situ del curso de agua en estudio.

Una parte fundamental de este tipo de estudios es la determinación de los datos en el campo. Cada curso de agua en estudio debe ser relevado en su totalidad. Cada tramo de relevancia, cada sección transversal representativa de cada tramo con similares

características debe relevarse y determinar secciones transversales, pendiente, características del material de fondo, rugosidad de fondo y paredes laterales, etc.

Entonces, será necesario establecer una línea de base de la calidad de agua del curso de agua. Para ello, se deberá seleccionar aquellos cursos de agua cuyas características de accesibilidad, tamaño del curso y cuenca, características, interés regional, asentamientos, condiciones ambientales, fuentes posibles de contaminación, entre otras. Se realizarán recorridos de campo para identificar secciones del arroyo donde se puedan obtener muestras de agua en forma sistemática, y poder así medir la sección del cauce.

La velocidad de escurrimiento del fluido es un parámetro fundamental a determinar. Se pueden utilizar distintos métodos y herramientas para este fin, en función de las características del curso de agua.

Además, se deberán tomar muestras de agua del curso en estudio con la finalidad de determinar la calidad del mismo, en todos los puntos representativos.

7.5.- Muestras y caracterización in situ de las descargas antrópicas.

Es fundamental la caracterización de cada vuelco de actividades antrópicas que se reciba el curso en estudio. Se identificarán los puntos de descarga al arroyo de efluentes industriales o domésticos.

Se de tomar muestras de las mismas con la finalidad de evaluar todos los parámetros físico químicos y microbiológicos de relevancia para el estudio, generalmente se tratará de los que estén reglamentados por la normativa local legal vigente.

La determinación del caudal del vuelco es otro aspecto de suma importancia. Según la normativa de la provincia de Entre Ríos, todas las industrias deben tener cámaras aptas para la toma de muestras y el aforo del caudal erogado. Generalmente este

aspecto se resuelvo con dispositivos hidráulicos, como son los vertederos de aforo, que pueden ser de sección triangular o rectangular. Los Canales Parshall podrían ser usados alternativamente, pero requieren mayor superficie de terreno para su implantación, por lo que, generalmente, se ubican dentro de la planta industrial en el conducto de ingreso al sistema de tratamiento de efluentes líquidos.

Con lo dicho, se deberá definir un programa de muestreo y relevamiento, seleccionando una serie de puntos accesibles que permitan en lo posible, definir secciones de control aguas arriba y abajo de los puntos de vuelco de efluentes contaminantes, cursos afluentes, y secciones de verificación de la dilución y decaimiento, hasta alcanzar su desembocadura en el Río Uruguay, u otro curso inferior.

Se deberán realizar muestreos de caracterización y se trasladarán las muestras adecuadamente preservadas y rotuladas al laboratorio de análisis, además de las determinaciones in-situ que se pudieren realizar con equipos móviles, en caso de contar con los mismos.

7.6.- Estimación de caudales mínimos.

Una vez finalizados los pasos mínimos indispensables para la materialización del estudio planteado se contará con un modelo matemático que simulará las condiciones del curso de agua en estudio, en diferentes condiciones. Con esta herramienta se podrán simular distintos escenarios y evaluar los efectos que sobre el objeto de estudio generan los mismos.

Entre estos distintos escenarios, se podrá evaluar las condiciones de tener distintos caudales y calidad del cuerpo de agua, como así también, distintos caudales y con distintos niveles de tratamiento de las distintas descargas que recibe.

Para alcanzar las metas propuestas en el presente trabajo y, con la finalidad de preservar las condiciones del recurso, no debe obviarse la simulación del escenario del caudal del cuerpo de agua en estiaje, es decir, a caudal mínimo.

A partir de los datos relevados en los apartados anteriores, tanto de archivos, bases de datos, gabinete, como así también de los relevamientos de campo, se podrán determinar, directa y/o indirectamente, los caudales del recurso en estudio, así como también, de sus afluentes y efluentes de todo tipo. A pesar de esto, el caudal mínimo no debe entenderse como el menor detectado en estos relevamientos.

Se deberán aplicar métodos matemáticos, en general basados en la probabilidad y estadística, para la determinación de los caudales de estiaje.

7.6.1.- Regionalización de caudales.

Para el desarrollo de obras de ingeniería es necesario evaluar el aspecto hidrológico en la zona de estudio para determinar los caudales de diseño, sin embargo, se presentan muchos casos en los cuales la información con la que se cuenta no es suficiente en calidad y/o en cantidad para la determinación de éstos.

Frente a este problema hay metodologías que permiten mediante el análisis de las diferentes variables hidrológicas de la región, llegar a tener un mayor entendimiento del comportamiento estocástico de ciertas variables requeridas para entender el comportamiento del recurso hídrico en un sistema de estudio dado.

Por ejemplo, se puede tener una red de estaciones hidrométricas a lo largo de una región, pero esta red difícilmente cubre todos los puntos para una adecuada evaluación del recurso hídrico, es decir, que se pueden presentar algunas lagunas temporales o espaciales, que deberán ser predichas en base a metodologías entre las cuales destaca la regionalización.

La metodología de regionalización es utilizada en hidrología para explorar al máximo la información hidrológica existente y permitir la transferencia de dicha información, de un punto a otro sin información suficiente, dentro de un área con comportamiento hidrológico semejante. Esta información puede ser de tres tipos:

Variable: Expresión que identifica el comportamiento de un proceso o fenómeno, como por ejemplo: el caudal instantáneo en una sección del río, el caudal medio anual, precipitación diaria, etc.

Función hidrológica: La cual representa la relación entre una variable hidrológica y una o más variables explicativas o estadísticas (probabilidad), como puede ser la curva de permanencia, curva de probabilidad de caudales mínimos, etc.

Parámetro: Representada como la característica de un sistema hídrico, como por ejemplo los parámetros fisiográficos de una cuenca (área, pendiente de la cuenca, pendiente del cauce, etc.), coeficiente de rugosidad, etc.

El principio de regionalización se basa en la similitud espacial de algunas funciones, variables o parámetros que permitan la transferencia de información de un punto a otro de una región. Pero se debe destacar que ningún estudio de regionalización puede sustituir una adecuada red de monitoreo hidrológico.

7.6.2.- Tipos de regionalización.

La regionalización hidrológica puede ser realizada por medio de:

Variabes: Cuando una variable como la precipitación media, caudales medio, caudal mínimo, tiempo de concentración, entre otras, pueden ser determinadas en una región por medio de relaciones establecidas a través de datos puntuales existentes.

Funciones: Cuando se puede estimar información hidrológica por medio de:

Parámetros de la función estadística: Cuando se considera que un tipo de distribución estadística se ajusta bien a los datos de una región.

Q_{max} para diferentes tiempos de retorno: En la cual por medio de información de los caudales máximos para diferentes periodos de retorno y su relación con características de las cuencas en análisis, se puede determinar el caudal máximo para diferentes periodos de retorno en otros puntos de la región. Este método se usa generalmente ante la falta de datos.

Por medio de curva de probabilidad adimensional: Cuando se determina la curva adimensional de probabilidad o curva regional en base a las relaciones de Q/Q_m vs tiempo de retorno para la zona de estudio, con la cual se puede determinar la curvas de caudal vs tiempo de retorno para la zona a regionalizar. Este método es útil cuando se tienen series cortas.

Parámetros: Los parámetros de una función o de un modelo matemático pueden ser determinados por la relación con características físicas de la cuenca.

Indicadores regionales: Son definidos como los valores medios de las variables que permiten una rápida estimación de una variable hidrológica, para atender su comportamiento. Como por ejemplo, el caudal específico medio y la relación entre el caudal mínimo y medio.

7.6.3.- Criterios para la regionalización de caudales.

La regionalización de caudales se puede dar siempre que se tenga información de esta variable en otros puntos de la misma región, la cual se encuentra definida por los límites de la cuenca hidrográficas. Sin embargo, los resultados de la regionalización dependerán de la calidad de los datos usados en el análisis.

Para una correcta aplicación del método de regionalización de caudales se debe tener en cuenta un análisis previo de la información a ser usada. Y este análisis previo a la regionalización requiere:

a) Definir y caracterizar la zona a regionalizar, describiendo la localización geográfica, ríos principales y sus afluentes, cobertura vegetal, distribución climática, etc.

b) Conocer las variables hidrológicas más adecuadas para el análisis de regionalización, teniendo en cuenta la orientación de la selección de dichas variables según la variable a ser regionalizada. Se debe tener en cuenta que dichas variables son sensibles a diferentes características físicas de la cuenca, como puede ser las condiciones climáticas, radiación, geología, geomorfología, evapotranspiración, cobertura vegetal, etc.

Dentro de estas variables hidrológicas, hay que conocer la importancia de tener datos tanto pluviométricos como hidrométricos para el estudio de regionalización. Los datos pluviométricos son datos hidrológicos medidos en puntos definidos de una cuenca y los datos hidrométricos son datos en secciones del río. Sin embargo, el primero observa la ocurrencia de la precipitación como una muestra puntual de un proceso espacial de entrada a un sistema y el segundo dato observa la integración espacial de la salida, representada por el escurrimiento espacial de la cuenca hidrográfica.

c) Análisis de la calidad de los datos hidrológicos para dar confiabilidad a los resultados de la regionalización, para ello se debe tener en cuenta:

- Al iniciarse el estudio debe establecerse el tipo de información con el que se cuenta y el periodo de ésta, la cual no debe ser menor de 5 años.
- Analizar la información seleccionada, evaluando la consistencia de dicha información, tanto desde el punto local como regional.

d) Definición de las variables explicativas. Estas variables son usadas para estimar el valor de la variable ha ser regionalizada. Las cuales pueden ser hidrológicos o físicas.

Las variables físicas, son aquellas que explican las características físicas de la cuenca. Entre las principales variables físicas tenemos:

- Área de drenaje
- Desnivel del río principal;
- Longitud del río principal;
- Pendiente del río principal;
- Pendiente de la cuenca;

Las variables explicativas hidrológicas, pueden ser la precipitación media, los caudales medios, máximos, mínimos, etc.

Conocida la información que será usada para regionalizar, el método propiamente envuelve los siguientes pasos:

a) Determinación de los caudales para diferentes periodos de retorno, en las estaciones de análisis, por medio de una distribución específica. El procedimiento para este ajuste es como sigue:

- Ordenar los caudales para cada estación, de forma decreciente;
- Determinación de la probabilidad de ocurrencia de estos caudales para diferentes periodos de retorno, aplicando la distribución de probabilidad que más se ajuste a la información. Estas distribuciones pueden ser:
 - Distribución de probabilidad Log – Normal 3.
 - Distribución Gumbel.
 - Distribución Gamma de 2 parámetros.
 - Distribución Gamma de 3 parámetros o Pearson III.

A la distribución de probabilidad adoptada, se le debe aplicar la prueba de bondad de ajuste, que permita evaluar si la distribución probabilística elegida es adecuada para la información analizada.

b) Determinación de la homogeneidad de las cuencas en estudio mediante un análisis de la relación entre el caudal para diferentes periodos de retorno vs variables explicativas.

Estas tendencias permiten conocer el grado de dispersión de las variables explicativas en las diferentes cuencas de análisis; si la tendencia no es muy grande se puede considerar que pertenecen a una misma región, pero si la tendencia de alguna de las cuencas difiere de la tendencia general, se considera que no pertenece a la misma región que las demás cuencas.

c) Determinación de la curva regional.

Esta curva es adimensional y viene dada por el promedio entre las relaciones Q/Q_m para diferentes periodos de retorno de las cuencas de estudio que forman parte de una misma región.

d) Determinación de la variable a regionalizar.

Con la curva regional y la variable explicativa del punto a ser regionalizado, se puede determinar la variable a regionalizar.

Por ejemplo, si tenemos la curva regional Q/Q_m para diferentes periodos de retorno, y el Q_m como variable explicativa del punto que se quiere regionalizar, se puede obtener el Q para diferentes periodos de retorno del punto a regionalizar.

7.7.- Aplicación del modelo matemático.

Con la totalidad de datos recopilados se inicia la calibración del modelo matemático. Para el caso en estudio, se determinó que la mejor alternativa era utilizar el Qual2K, de la EPA, que ya fue descrito anteriormente.

Se deberá implementar el modelo matemático hidrológico del curso del arroyo, delimitando la cuenca de aporte y sus características, para establecer condiciones de flujo en ocasión de ocurrir precipitaciones de diversa intensidad. Esta será la primera aproximación a la calibración del modelo. Seguidamente, se reiterará el proceso descrito de toma levantamiento de datos y muestreo, con la finalidad de calibrar el modelo.

7.7.1.- Condiciones generales de modelación.

Como se dijo, por extrapolación de flujos basales por unidad de área de cursos cercanos, se estudiará el flujo de base (en estiaje) de los arroyos en estudio para, de esta forma estimar una curva de frecuencia de caudales, a los efectos de definir las condiciones de estiaje a ser empleadas para los estudios de calidad de agua.

Los datos relevados, y los determinados matemáticamente, se volcarán en el modelo de calidad de aguas del curso del arroyo, simulando las condiciones de dilución y decaimiento de los contaminantes más significativos encontrados en el muestreo de Línea de Base. De esta forma se verificará la magnitud del aporte contaminante de cada efluente, y su impacto en el curso de agua.

En particular, en el tipo de estudio planteado, se recomienda no tener en cuenta los efluentes provenientes de actividades agropecuarias, sobre todo los relacionados a los agroquímicos aplicados a grandes extensiones de campo, por tratarse de cargas difusas de difícil cuantificación y modelación.

De esta forma, podrá estimarse la carga máxima admisible por cada industria aportante al arroyo, para mantener una calidad de agua aceptable según el uso del curso de agua. Para ello, será necesario definir los usos de estos cursos de agua, para de esta forma, determinar los parámetros que deben mantenerse y/o cumplirse en cada tramo o porción en estudio, en función de la legislación vigente. Esto conlleva a que, a través del estudio de las características hidráulicas, hidrológicas y fisicoquímicas, entre otras, de estos cursos de agua, sumado a la caracterización de las descargas que reciben, se pueda determinar cómo reaccionan e interaccionan con las mismas para, de esta forma, entender cómo evolucionan los contaminantes una vez incorporados al cuerpo de agua, de manera de proteger el recurso y poder asegurar la adecuada calidad de los ecosistemas que alberga.

Se recomienda adoptar como guía para la calidad de agua a mantener, en los cursos de agua en estudio, al Digesto de CARU Para el Uso y Aprovechamiento del Río Uruguay. En él, se fijan 8 “Usos Legítimos” de las aguas del Río Uruguay, los cuales pueden extrapolarse a los cursos de agua inferiores, a saber: Abastecimiento público para bebida y usos comunitarios, Recreación, Actividades agropecuarias, Conservación y desarrollo de la vida acuática, Pesca, Abastecimiento industrial, Navegación y Generación de energía. Atendiendo a los usos legítimos preponderante, las aguas del río se clasifican en:

Uso 1: Aguas crudas o brutas destinadas al abastecimiento público con tratamiento convencional.

Uso 2: Aguas destinadas a actividades de recreación con contacto directo.

Uso 3: Aguas destinadas a actividades agropecuarias.

Uso 4: Aguas destinadas a la conservación y desarrollo de la vida acuática.

7.7.2.- Calibración del modelo matemático.

Una vez que se han realizado las primeras cargas y corridas del modelo, se deberá iniciar un proceso de calibración continuo, que se irá perfeccionando y ajustando con cada monitoreo del proceso que debe plantearse.

En primer lugar se deberán obtener los valores de los parámetros que utiliza el modelo, los cuales pueden medirse directamente en el campo u obtenerse utilizando técnicas de optimización a partir de valores conocidos de las variables de entrada, iniciando el proceso con valores obtenidos de bibliografía específica, que produzcan los correspondientes resultados en las variables de estado y de salida.

Puede darse la situación de que se necesiten conocer parámetros que no puedan medirse por la falta de tecnología apropiada o su elevado coste. En este caso se deberán utilizar funciones de transferencia que permitan obtener a partir de variables conocidas o fáciles de medir las variables que plantean dificultades.

Los muestreos, al igual que los modelos, son también abstracciones de la realidad. Por tanto, al igual que en la modelización, es imprescindible diseñar la estrategia de muestreo de forma adecuada a los parámetros que van a medirse y a los objetivos de la campaña de muestreo. Hay que tener en cuenta que un modelo puede no dar los resultados adecuados debido a una campaña de muestreo inadecuada.

Es necesario comprobar que el modelo se comporte de manera adecuada y los valores obtenidos por el modelo para las variables de estado y de salida son similares a los medidos directamente. Lo más habitual es utilizar procedimientos estadísticos basados en las magnitudes de los errores.

Los ordenadores son capaces de devolvernos valores ilusoriamente precisos con muchas cifras decimales, pero es necesario tener en cuenta que su exactitud no puede ser mayor que la precisión de los parámetros y variables de entrada.

Si el modelo produce errores inaceptables puede ser por varias causas:

- El modelo no es apropiado para modelizar el sistema.
- El modelo es apropiado pero está mal construido (errores de programación, errores en las ecuaciones).
- Las variables y parámetros utilizados no se han medido correctamente.

La solución de estos problemas implica la reconstrucción del modelo. Por tanto el proceso de modelización es iterativo e interactivo. Los errores pueden surgir en cualquier fase del proceso de modelización, en la identificación, en la toma de datos, pueden aparecer errores en el cálculo con decimales, etc.

7.7.3.- Explotación del modelo matemático en diferentes condiciones de caudal.

Con el modelo calibrado, se deberán simular diferentes escenarios a los efectos de estudiar la sensibilidad de los resultados ante diferentes hipótesis en relación al vertido, a las condiciones hidráulicas y de calidad de agua iniciales del curso de agua en estudio, y a la temperatura ambiente que influye sobre el oxígeno disuelto en el mismo.

Se deberá optar por la generación de escenarios en condiciones estables y variables.

Se puede generar un escenario de condición estable de una, alguna o todas las descargas en estudio. Esto plantea un escenario en el caso de contarse con una sola descarga y varios escenarios en caso de dos o más descargas.

Otro escenario que es importante evaluar es el que contempla condiciones estables del curso de agua en estudio. Con distintas condiciones de caudal estacionario en el curso, será posible evaluar diferentes condiciones de descargas.

También es recomendable evaluar el modelo con condiciones variables del o los vuelcos, como así también con condiciones variables del curso de agua.

Estos escenarios son fundamentales para el estudio y no deben pasarse por alto en ningún caso. En general pueden utilizarse los parámetros de descarga medidos en cada descarga, como así también los impuestos por la legislación vigente en un primer momento. De esta forma se puede estudiar la superposición de los efectos reales, como así también los reglamentarios, y comprender los efectos de la/las misma/s en el curso de agua, como así también, de la superposición en caso de contarse con dos o más descargas.

7.8.- Desarrollo de un programa de monitoreo continuo del curso de agua y las descargas antrópicas que recibe.

Como ya se comentó en apartados anteriores, los cursos de agua a estudiarse deberán ser recorridos y relevados en su totalidad con la finalidad de identificar todas las características relevantes para la modelación de los mismos.

Adicionalmente se deberán identificar y seleccionar puntos de muestreo de acceso rápido, de manera que puedan relevarse continuamente las condiciones del curso de agua en períodos representativos de las diferentes estaciones del año, atendiendo a las condiciones de precipitaciones extraordinarias, como así también a las épocas de sequía y toda otra condición que pudiera ser de importancia a los efectos del estudio planteado.

Se recomienda que estos lugares de muestreo de fácil acceso se ubiquen en sitios como puentes, alcantarillas, bajo caminos y demás lugares accesibles desde vías de comunicación en buen estado, de manera de que se puedan relevar la mayor cantidad de estos puntos, de manera lo más eficiente posible.

Se deberán tomar muestras para análisis de laboratorio, muestras de parámetros in situ, medición de temperatura, velocidad de escorrentía, altura del pelo de agua, etc.

Los períodos de muestreos continuos deberán definirse en cada caso con criterio técnico, en función del estudio a desarrollarse.

7.9.- Conclusiones y recomendaciones para el curso de agua en estudio.

Luego de realizados los trabajos de relevamiento, recopilación de datos, calibración y corrida del modelo y todos los pasos hasta aquí enumerados, además de otros que pudieran surgir y ser necesarios en diferentes situaciones o escenarios que se planteen en la aplicación del método, se obtendrán resultados para cada escenario simulado.

Una parte fundamental del trabajo es el análisis de los datos obtenidos de lo que se obtendrán las conclusiones y recomendaciones para el curso de agua en estudio.

Esta etapa es fundamental, ya que, el o los técnicos que hayan llevado a cabo el estudio deberán presentar, en esta etapa, los resultados de manera que sean accesibles al público en general, es decir, que la conclusión, además de resumir los resultados obtenidos, se deberá expresar los mismos, de manera que cualquier persona, con una mínima formación común, pueda interpretarlos.

Este aspecto es inevitable cuando el estudio se realiza por o a pedido de organismos del Estado, donde los expedientes pueden ser solicitados por particulares, por funcionarios judiciales, entre otros.

En caso de tratarse de un estudio con fines de investigación realizado por articulares, podrá obviarse esta salvedad, todo dependerá de a quién estará dirigido el trabajo y sus resultados.

8.- Conclusión.

La temática abordada se centra en la problemática ambiental, estudiando la contaminación de una parte muy importante del recurso hídrico de la provincia de Entre Ríos, con el impacto en la salud y la calidad de vida de la población que esto supone.

La contaminación del agua de la región es causa permanente de conflicto y discusión social, generando denuncias y reclamos por parte de diferentes actores sociales. Por ello investigar y desarrollar modelos calibrados que ayuden en el pronóstico y evaluación de los diferentes escenarios, permitirán tomar decisiones acertadas y fundamentadas en aspectos científico tecnológicos, respecto a la regulación de las actividades antrópicas potencialmente generadoras de sustancias que afectan al recurso hídrico.

En el mismo sentido, este estudio permitirá seguir la evolución de la calidad del recurso, y del grado de contaminación de los vertidos al arroyo, y detectar el plazo requerido para la normalización de la calidad de agua a partir de la entrada en funcionamiento de los sistemas de tratamiento de los vertidos, tanto en el caso de industrias, como de afluentes cloacales.

El método desarrollado no es la única alternativa para el estudio de la capacidad de autodepuración de los cursos de agua, pero la mayoría de los pasos descritos son indispensables para realizar una correcta caracterización del curso de agua en estudio.

Respecto de la elección del modelo a implementar, puede ser motivo de discusión y cada profesional podrá tener su opinión, la cual, seguramente, tendrá sus fundamentos, ventajas y desventajas. Como se dijo se priorizó, ante todo, que los modelos evaluados sean de código abierto, para lograr un método que esté al alcance de cualquier persona interesada, sin perjuicio de los medios económicos con que cada interesado cuente.

Con el método desarrollado, se logra el objetivo, con las premisas descriptas, con resultados satisfactorios. Lo cual, no deja exento al método de ser perfeccionado y/o

modificado en función de las necesidades y situaciones que pudieran surgir en cada caso de estudio.

Bibliografía.

- *Ingeniería de Aguas Residuales: tratamiento, vertido y reutilización (Tercera Edición)*. Metcalf & Eddy, Inc. McGraw – Hill.
- *Ley Provincial Nº 6260 “de prevención de la contaminación por parte de las industrias” y sus Decretos Reglamentarios*.
- *Digesto Sobre el Uso y Aprovechamiento del Río Uruguay de la Comisión Administradora del Río Uruguay (C.A.R.U.)*.
- *Apuntes de Cátedra “Ingeniería Sanitaria” – Carrera de Ing. Civil – UTN FRCU - Ing. Fernando A. Lescano*.
- *Apuntes de Seminario “Modelación Ambiental. Transporte de contaminantes en medios acuáticos” – Maestría en Ingeniería Ambiental – UTN FRCU – Lic. Julio Cardini*.
- *“Lenntech” Water Treatment Solutions - <http://www.lenntech.es/>*.
- *BRANCO, S. M., 1984. Limnología sanitaria, estudio de la polución de aguas continentales. Ser. Biol. Monogr. 28, OEA: 120 pp.*
- *“Elaboración de una línea de base del estado de contaminación del agua en el arroyo El Pelado. Departamento Colón. Provincia de Entre Ríos”. – Grupo GEGRU – UTN FRCU*.
- *“Estudio de la descarga de la planta de tratamiento de efluentes del Parque Industrial de Galeguaychú en el Arroyo El Cura”. – Grupo GEGRU – UTN FRCU*.
- *Apuntes del Seminario “Aguas Residuales” de la Especialización y Maestría en Ingeniería Ambiental de la FRCU – UTN. Ing. Jorge Durán*.
- *“Modelación integrada de cantidad y calidad del agua en la cuenca del río Araguari, Brasil” – Artículo de Investigación – Marcio Ricardo Salla, Javier Paredes-Arquiola, Abel Soldera y otros - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia España*.
- *“Modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó” – Lino Valcárcel Rojas, Jorge Borroto Portela, Nancy Alberro Macías y otros. - Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN), Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras (ICINAZ)*.
- *“Modelación de la calidad del agua del río Tula, Estado de Hidalgo, México” – Rosalba, Montelongo Casanova, Alberto José Gordillo Martínez, Elena María Otazo Sánchez y otros - Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*.
- *“Mecánica de los fluidos e hidráulica” Tercera Edición – Randal V. Giles, Jack B. Evett, Cheng Liu*.
- *Seminario AIDIS ARGENTINA “Criterios de selección de tecnologías de depuración de líquidos cloacales” - Mendoza, 10 y 11 de mayo del 2000 - Disertante: Ing. Luis E. Higa*.
- *“Normas de Estudio – Criterios de Diseño y Presentación de Proyectos de Desagües Cloacales – Proyectos y Diseños Típicos” – Volumen III - Cuadernos del ENOHS*.
- *“Manual de hidráulica” – Ing. Dante Dalmati*.