

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y PROYECCIÓN DEL RIESGO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Vivian Juliette Cortés Arévalo¹; Maryluz Pineda Moreno²; Rafael Orlando Ortiz Mosquera³; Efraín Antonio Domínguez Calle⁴

Resumen – En los sistemas de abastecimiento hídrico, el régimen hidrológico de las fuentes abastecedoras es el mayor factor de incertidumbre de los mismos. Esta planificación del abastecimiento seguro del agua, debe ser analizado en términos de la solución de problemas de orden técnico, y la relación oferta - demanda de agua y sus proyecciones. Bajo estas condiciones se propone una metodología para cuantificar los diferentes niveles de riesgo en sistemas de abastecimiento hídrico superficial, considerando la relación oferta - demanda, como factor clave del análisis fundamentado en el Índice de Escasez para agua superficial del IDEAM y la modelación hidrológica de la Ecuación de Fokker – Plank – Kolmogorov. Se busca reorientar la gestión del sistema de suministro, interpretándolo como un sistema productivo cuya funcionalidad a nivel hidrológico depende tanto de la variación en el rendimiento de la fuente, como de la adecuada proporción entre el volumen ofertado por la misma y la demanda ejercida por la población sobre el sistema, garantizando así el abastecimiento seguro del agua en cuanto a la variabilidad hidrológica se refiere.

Summary - In the systems of hydric supplying, the hydrologic regime of the supplying sources is the greater source of uncertainty of such. This planning of the safe supplying of the water, it must be analyzed in terms of the solution of problems of technical order, and the relation supplies - demand of water and its projections. Under these conditions a methodology sets out to quantify the different levels from risk in systems of superficial hydric supplying, considering the relation it supplies - demand, like key factor of the analysis based on the Index of Shortage for superficial water of the IDEAM and the hydrologic modeling of the Equation of Fokker - Plank - Kolmogorov. One looks for to reorient the management of the provision system, interpreting it as a productive system whose functionality at hydrologic level depends as much on the variation in the yield of the source, like of the suitable proportion between the volume supplied by same and the demand exerted by the population on the system, guaranteeing therefore the safe supplying of the water as far as the hydrologic variability one talks about.

Palabras Claves: Sistemas de Abastecimiento, Evaluación del Riesgo.

Keywords: Systems of drinking water supply, Evaluation of Danger.

¹ Universidad Nacional de Colombia - Ingeniera Civil – Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola – Unidad de Hidráulica –Bogota, Colombia. E-mail: vjcortesa@unal.edu.co

² Universidad Nacional de Colombia - Ingeniera Civil – Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola – Unidad de Hidráulica – Bogota, Colombia. E-mail: mpinedam@unal.edu.co

³ Universidad Nacional de Colombia - Ingeniero Civil – Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola – Unidad de Hidráulica – M. Sc. En Docencia – Candidato a M. Sc. en Recursos Hidráulicos – Director de la Unidad de Hidráulica - Integrante GIREH (Grupo de investigación de Recursos Hídricos) - Bogota, Colombia. Tel: (+57) 1 3165000 Ext. 13474 – Fax: (+57) 1 3165563 E-mail: roortizm@unal.edu.co

⁴ Ingeniero Hidrólogo – Ph.D. en Ciencias Técnicas - Subdirección de Hidrología del IDEAM - Instituto de Estudios Ambientales y Meteorológicos Bogotá (Colombia). E-mail: edc@ideam.gov.co

INTRODUCCIÓN

La metodología de análisis y proyección del riesgo en sistemas de abastecimiento hídrico se desarrolla dentro de los lineamientos que están contenidos en el convenio suscrito entre la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto de Estudios Ambientales y Meteorológicos IDEAM, (Convenio inter - administrativo N° 085), que contempla aspectos de interés nacional relacionados con la temática ambiental. Su desarrollo hace un valioso aporte a la línea de investigación “Uso Racional del Agua” del Grupo de Investigación de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional GIREH y la línea de modelación hidrológica de la Subdirección de Hidrología del IDEAM.

En sistemas de abastecimiento hídrico, la experiencia demuestra que existen varios factores que pueden afectar el adecuado funcionamiento de sus diferentes componentes (captación, aducción, planta de tratamiento, conducción, almacenamiento y distribución), bien sean de origen natural o antrópico, o debido a las características intrínsecas de la infraestructura; sin embargo, la variación en el *régimen hidrológico de las fuentes abastecedoras, los efectos del cambio climático global y fenómenos como el Frío y Cálido del Pacífico Central* constituyen la mayor fuente de incertidumbre sobre la funcionalidad de los mismos. Es así, como por medio de la presente investigación se plantea una metodología de aplicación general, que permita cuantificar los niveles de riesgo de desabastecimiento en sistemas de suministro de agua potable considerando los efectos de este tipo de fenómenos hidrológicos sobre las fuentes de abastecimiento; aplicando la relación oferta – demanda hídrica del sistema como elemento de gestión, fundamentado en el índice de escasez del IDEAM y la modelación hidrológica de la Ecuación de Fokker – Planck - Kolmogorov.

Comentario [R01]:

CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO DE DESABASTECIMIENTO Y SUS ELEMENTOS

En general, el alcance de una evaluación de riesgo y el tipo de metodología a implementar, depende principalmente de los tipos de fenómenos analizados y elementos expuestos, la resolución temporal y espacial del estudio, y la disponibilidad de la información necesaria; por lo que son los objetivos, alcances y limitaciones del problema planteado los que definen los criterios para su evaluación, a partir de los cuales se determina la profundidad y requerimientos del análisis y la confiabilidad asociada a los resultados obtenidos.

Como fundamento del esquema metodológico formulado se tomaron las propuestas del PNUD – UNDRO (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - Coordinación de las Naciones Unidas para el socorro en casos de desastre) y la EPA (Environmental Protection Agency). En la Tabla 1. se resumen las características de sus respectivos enfoques y la correlación que existe entre los mismos.

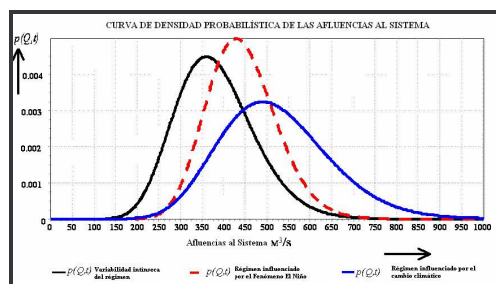
Tabla 1 - Esquema conceptual de las metodologías analizadas

METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DEL RIESGO ANALIZADAS			
PNUD – UNDRO		EPA	
AMENAZA	Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una magnitud a para un periodo de tiempo t	Caracterización de la naturaleza, y efectos adversos que el agente produce. (PROCESO GENERADOR DE DAÑO DEL FENÓMENO)	AMENAZA
VULNERABILIDAD	El término de vulnerabilidad es propuesto por el PNUD - UNDRO para evaluar la susceptibilidad de los elementos expuestos a ser dañados como consecuencia de la acción del fenómeno en una magnitud dada y durante un periodo de tiempo específico. Comprende las siguientes actividades: Identificación de los ELEMENTOS EXPUESTOS. Determinación de la intensidad y el PROCESO GENERADOR DE DAÑO DEL FENÓMENO Evaluación del MODO DE DAÑO del fenómeno sobre los elementos considerados. La interrelación 2 y 3 conforman las FUNCIONES DE DAÑO del evento sobre el elemento, que en otras palabras no es más que la respuesta del elemento frente a solicitud del fenómeno (ANÁLISIS DE AMENAZA - RESPUESTA) y para este planteamiento define la vulnerabilidad.	En esta etapa se determina la relación entre el agente amenazante (para una magnitud e intensidad dada) y la respuesta del elemento expuesto para esa solicitud. A partir de este análisis se establece la FUNCIÓN DE DAÑO	AMENAZA – RESPUESTA (DOSIS – RTA)
		Describe los ELEMENTOS EXPUESTOS a la acción de agente determinado, la magnitud, duración y MODO DE DAÑO del fenómeno sobre el elemento considerado	EXPOSICIÓN
RIESGO	El riesgo se determina a partir de la relación entre la amenaza y la vulnerabilidad, por lo que se define en términos de la probabilidad y los elementos afectados. Se plantea para su cálculo la siguiente expresión matemática, sin embargo el tipo de estimación de pérdidas depende de los intereses de la investigación: $R_{ij} = H_j \times V_{ij}$	Integra los resultados de cada etapa: Caracterización de la amenaza, Análisis cuantitativo de la Amenaza- Rta y los estimativos de la Exposición. Probabilidad que los fenómenos analizados puedan propiciar una situación de daño sobre el elemento expuesto. No se define una expresión matemática para su cálculo ya que depende de las características propias de los elementos y fenómenos analizados.	RIESGO
La relación entre la amenaza y los elementos expuestos puede variar en función de diferentes escenarios de exposición y de intensidad del fenómeno, por lo que para hacer un análisis más completo del riesgo se hace necesario definir ESCENARIOS PARA LA EVALUACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS INTERESES DEL PROYECTO.			

Para formular la metodología de evaluación del riesgo, es necesario redefinir los elementos conceptuales que componen el riesgo, para la aplicación específica a sistemas de abastecimiento así:

Amenaza

Para los fines del presente proyecto, la amenaza es fijada como la potencialidad de afectación de las condiciones extremas (inferiores) del régimen hidrológico de la fuente abastecedora, como consecuencia de los efectos que sobre el mismo genera la variabilidad intrínseca del régimen, el cambio climático global y fenómenos como el Frío y Cálido del Pacífico, lo cual es resumido en la Grafica 1.



Grafica 1. Enfoque de la amenaza dentro de la evaluación.

Elementos Expuestos

Debido a que no se está analizando la infraestructura del sistema, los elementos expuestos se reducen a la *población servida por el sistema* en la medida en que se vería comprometida la satisfacción de sus requerimientos debido a los efectos que sobre el régimen hidrológico de la fuente generan los agentes analizados.

Exposición

La exposición describe las condiciones del contacto entre los agentes amenazantes y el sistema analizado.

El estado del mismo se refiere a las condiciones de la infraestructura como:

- Las condiciones de los componentes del sistema, la vida útil de las diferentes estructuras hidráulicas, materiales, mantenimiento, redundancia y facilidades del sistema (almacenamiento y distribución) etc., los cuales si bien influyen en su respuesta, no tienen relación directa con los fenómenos analizados, por lo que no son considerados en el análisis.
- La demanda de la población es otra variable que podría condicionar la respuesta del mismo ante las solicitudes de interés, ya que frente a oscilaciones representativas de la demanda con respecto al tiempo que no hayan sido consideradas dentro de las condiciones ordinarias de su funcionamiento pueden hacerlo más susceptible en su interrelación con los fenómenos amenazantes.

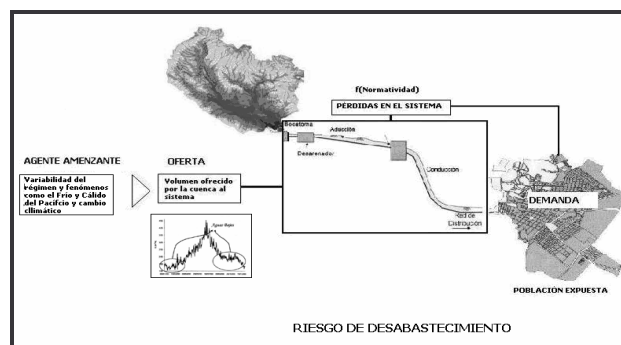
La exposición es analizada a través de la prehistoria del régimen hidrológico, la cual es representada por medio de procesos markovianos modelados con la Ecuación de Fokker – Planck – Kolmogorov, definiendo así el pronóstico de la curva de distribución probabilística de la fuente abastecedora dadas unas condiciones iniciales específicas.

Desde el punto de vista físico, el riesgo es la pérdida esperada en un periodo de tiempo asociado a uno o varios fenómenos de análisis, lo cual puede ser expresada en función de su probabilidad de ocurrencia o como una proporción del valor o costo de reemplazo de los elementos bajo riesgo.

Pese a que la funcionalidad de este tipo de sistemas puede verse afectada por múltiples variables y fenómenos, es de interés para la investigación la influencia de fenómenos hidrológicos específicamente; por lo que para los fines de este trabajo el riesgo es definido como *la probabilidad de que se genere una situación de desabastecimiento de agua potable en la población de una magnitud dada, durante un periodo de tiempo específico y para un sistema de suministro en particular, que pueda entorpecer el normal funcionamiento del sistema impidiéndole la satisfacción del servicio para el que inicialmente fue diseñado; como consecuencia de los efectos que sobre el régimen de las fuentes hídricas de abastecimiento ocasiona la variación intrínseca del mismo, la acción de fenómenos climatológicos como el Frío y Cálido del Pacífico y el cambio climático global.*

ELEMENTOS DE ANÁLISIS DEL SISTEMA DE ASBASTECIMIENTO EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

Un sistema de abastecimiento está constituido por un conjunto de obras, estructuras hidráulicas, equipos y materiales utilizados para la captación, aducción, conducción, tratamiento y distribución de agua potable a la población. Cada uno de los componentes de este sistema tiene asociado un mayor o menor grado de vulnerabilidad en función de su predisposición al daño y su nivel de exposición frente a factores naturales o antrópicos, cuyos efectos comprometen la seguridad, estabilidad, capacidad de servicio y durabilidad de sus elementos y/o del sistema en general.



Grafica 2 - Enfoque de la evaluación de riesgo de desabastecimiento

A partir de este enfoque se plantea entonces analizar los sistemas de abastecimiento de agua potable desde el punto de vista productivo, y el riesgo de desabastecimiento. A continuación se plantea el enfoque de los elementos bajo consideración dentro de la evaluación:

Oferta Hidrica Neta De La Fuente Abastecedora Al Sistema

El agua es un elemento vital para el funcionamiento de un sistema de abastecimiento de agua potable, ya que constituye su medio de producción para prestar el servicio de suministro del recurso a la población. Sin embargo su disponibilidad no es exclusiva para el sistema, sino de todo el entorno del que forma parte.

Oferta Total De La Fuente Abastecedora Al Sistema De Suministro

El primer paso para la evaluación de la oferta neta de la fuente al sistema, consiste en la definición de la oferta hídrica superficial total de la misma antes del punto de captación; la cual refleja toda el agua que circula por la fuente abastecedora a la altura del punto de toma del sistema.

Factor De Reducción Para Mantener El Régimen De Estiaje (R_e)

Este factor se establece con base en las características del régimen de estiaje de la fuente abastecedora antes de la captación del sistema, lo que conforme con el modelo metodológico propuesto por el IDEAM en el Índice de Escasez, sería

$$R_e = \frac{Q_{97.5\%}}{\bar{Q}} \quad (1)$$

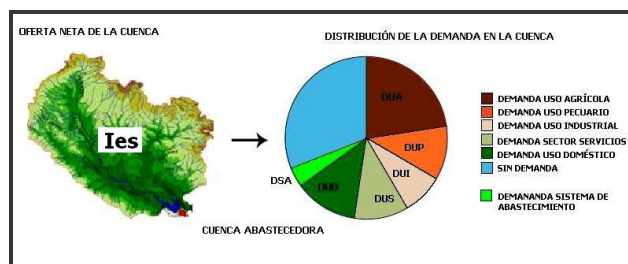
Factor De Reducción Para Protección De Fuentes Frágiles (R_f)

Al igual que en el Índice de Escasez del IDEAM, este factor es función del valor modal de la escurrentía ($\bar{Q}$), su coeficiente de variación (Cv), su coeficiente de asimetría (Cs) y de la persistencia (D) de los caudales diarios, expresado de la siguiente manera:

$$R_f = f(\bar{Q}, Cv, Cs, D) \quad (2)$$

Factor De Reducción Por La Presión Sobre El Recurso (R_p)

Es necesario estimar el caudal que debe quedar en la fuente a la altura del punto de captación para no interferir con el desarrollo de las demás actividades humanas; sin embargo su cálculo no es tarea fácil, debido a que se requería de la cuantificación de las demandas aguas abajo de la estructura de captación del sistema, lo que en términos de la aplicabilidad de la evaluación dificultaría su estimación. Lo descrito anteriormente es esquemáticamente mostrado en la Grafica 3.



Grafica 3 - Enfoque índice de escasez de la cuenca

Como herramienta metodológica, se propone una aproximación que si bien puede que no se ajuste del todo a la realidad permite considerar la presión que sobre el recurso ejercen

las demás demandas asociadas a la misma fuente. En ese sentido es importante, determinar tanto la magnitud de la oferta de agua disponible en toda la cuenca de abastecimiento como la relación de esta oferta con la demanda de agua existente sobre la misma, lo cual es analizado a partir del *Índice de Escasez de agua superficial* propuesto por el IDEAM aplicado para la cuenca abastecedora, que representa la relación porcentual entre la oferta hídrica de la cuenca y la demanda sobre la misma:

$$I_{ES\ CUENCA} = \frac{D_{CUENCA}}{O_{n\ CUENCA}} \times 100\% \quad (3)$$

Este índice es calculado para la cuenca a la cual pertenece la fuente de abastecimiento siguiendo la metodología propuesta por el IDEAM para su cálculo, y su valor representa además del porcentaje de la oferta hídrica utilizada en la cuenca, la reducción sobre la oferta neta de la fuente al sistema, así:

$$R_p = \%I_{ES\ CUENCA} \quad (4)$$

Demanda Bruta Del Sistema

La función principal del sistema de abastecimiento de agua potable es satisfacer las necesidades de agua de la población tanto para el consumo humano como para el desarrollo de las actividades socioeconómicas. Así mismo, de acuerdo con la demanda que deba servir el sistema, se establece el volumen requerido por el mismo sobre la fuente; el cual no solo es función de la población sino también de la eficiencia del sistema durante el proceso de obtención de agua potable.

Para sistemas de abastecimiento de agua potable, la demanda total debe ser estimada a nivel diario, bien sea mediante su estimación directa en este periodo de tiempo o mediante su disgregación a esta resolución temporal, a partir de lo cual se obtiene la demanda media diaria como función de la demanda total bruta del sistema según la agregación temporal escogida para esta última:

$$[Dmd = f(DT_{BRUTA})]_{SA} \quad (5)$$

Adicionalmente, según la RAS 2000 (B.2.7.2.) los requerimientos del sistema sobre la fuente abastecedora se establecen can base en el consumo máximo registrado durante 24 horas en un periodo de un año, lo que sin registros a nivel horario para la demanda, se estima a partir de la demanda media diaria (Dmd) así:

$$DMD = k_1 \times Dmd \quad (6)$$

El coeficiente de consumo máximo diario (k_1), se obtiene de la relación entre el mayor consumo diario y el consumo medio diario, utilizando los datos registrados en un periodo mínimo de un año. En caso de no contar con registros, el coeficiente de consumo máximo diario depende del **nivel de complejidad del sistema** como se establece en la Tabla B.2.5. de la RAS 2000.

De acuerdo con lo anterior, la demanda bruta del sistema sobre la fuente es función de los siguientes componentes:

Demanda Neta Del Sistema (D_{neta})_{sa}

La demanda neta comprende la cantidad mínima de agua requerida para satisfacer las necesidades de la población servida de acuerdo con los diferentes usos del agua asociados al sistema, sin considerar incrementos adicionales relacionados con las pérdidas generadas durante el proceso de producción de agua potable. En condiciones ideales este volumen se obtiene a partir de las mediciones efectuadas por la entidad prestadora del servicio, a través de sistemas de macro y micro medición que le permiten contabilizar el agua suministrada a los usuarios. Sin embargo, para la mayoría de las empresas del país (especialmente a nivel municipal), no existe un sistema de información consolidado de la demanda en el que se mida y registre su variación con respecto al tiempo, por lo que para su cálculo se plantean diferentes escenarios de acuerdo con la información disponible, cuya contabilidad debe ser previamente verificada.

Sea cual fuere el medio de estimación para la demanda del sistema, en caso de contar con registros de facturación del volumen proporcionado a los usuarios, se debe comparar con este último para verificar que el valor estimado sea superior al facturado, escogiendo siempre el mayor de los dos como demanda total neta.

Pérdidas En El Sistema (%P)_{sa}

El proceso de producción de agua potable una vez se ha garantizado la disponibilidad del recurso para su entrada al sistema, es función de las características estructurales y funcionales de cada uno de los elementos que lo contienen y de su adecuada operación e interacción. Un análisis de riesgo de desabastecimiento sobre los mismos requeriría de la consideración de variables y fenómenos adicionales para cada uno de los componentes, que cobran igual o mayor peso que la variabilidad hidrológica de la fuente para su análisis, pero que no forman parte del objetivo del presente proyecto.

Comentario [R02]:

ESQUEMA METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DESABASTECIMIENTO

Una vez definidas las variables bajo consideración y el enfoque dentro de la teoría del riesgo, se propone el siguiente esquema metodológico que plantea las consideraciones y secuencia del análisis para la evaluación del riesgo de desabastecimiento, así:

Evaluación A Nivel Preliminar

Constituye una etapa previa de la evaluación, en la que una vez documentado el caso de estudio se caracteriza y establecen los componentes críticos del sistema analizado con base en la información existente.

Formulación Del Problema A Nivel Preliminar

La problemática a analizar mediante la presente metodología, se fundamenta en la evaluación de los efectos de las condiciones extremas del régimen hidrológico de las fuentes abastecedoras, una vez han sido influenciadas por su variabilidad intrínseca y los fenómenos analizados; a partir de los cuales el volumen ofertado por las fuentes puede verse disminuido comprometiendo la disponibilidad de agua para satisfacer la demanda de la población servida.

Una vez escogido el sistema de abastecimiento sobre el cual se pretende implementar la presente metodología, se debe identificar la problemática antes descrita a partir de la recolección de información existente al respecto (estudios, planos, informes, visitas, etc.); con base en los cuales se desarrollan las siguientes actividades:

- Caracterización del sistema de abastecimiento a considerar.
- Caracterización de la demanda y del servicio prestado.
- Identificación y priorización de los agentes amenazantes del sistema en general.
- Caracterización de la zona de estudio limitada por las cuencas abastecedoras y la ubicación geográfica de la población abastecida.
- Formulación del problema, a partir de lo cual se identifica:
 - Agentes amenazantes de interés: variabilidad del régimen hidrológico de la fuente, la influencia de fenómenos como el Frío y Cálido del Pacífico, y el cambio Climático Global.
 - Componentes del sistema a analizar: Fuentes abastecedoras
 - Elementos expuestos: Población abastecida
 - Espacio geográfico entorno al cual se va a generar el análisis: Cuencas abastecedoras y sector abastecido.

Identificación De Los Puntos Críticos Del Sistema A Nivel Preliminar

Después de formulado el problema a nivel preliminar, se identifican los puntos críticos del sistema, evaluando cada uno de los componentes de interés en función de la presión que sobre los mismos ejerce el sistema. El criterio propuesto en la presente metodología para evaluar los componentes críticos del sistema, se establece con base en la población abastecida por cada componente analizado, *considerando como punto crítico aquel que sostenga más del 10% de la población abastecida*; a partir de lo cual se pueden descartar aquellos componentes catalogados como no críticos, en la medida que su aporte dentro del sistema puede considerarse despreciable frente a las demás fuentes abastecedoras.

Además se pueden establecer criterios adicionales y/o modificados, según el tipo de sistema analizado, las condiciones del mismo y los objetivos de la evaluación, cuidando siempre de exponer y justificar cualquier planteamiento a utilizar.

Línea Base De La Evaluación

En los pasos siguientes se establece la *línea base de la evaluación*, soportada sobre la preliminar, pero basada en una caracterización más detallada:

Formulación Del Problema

Con la revisión de los puntos críticos, se refina el problema inicialmente planteado, por medio de las siguientes actividades:

- Revisión y mejoramiento de la información recopilada sobre la oferta y la demanda.
- Objetivos, alcances y limitaciones de la evaluación.
- Selección de los criterios de evaluación y control para el análisis de la amenaza y la exposición.
- Formulación de las hipótesis de trabajo.

Eliminado: ¶
¶

- Período de análisis de la evaluación (proyecciones).
- Replanteo de problema formulado con base en el análisis de los puntos críticos.

Diseño Del Plan De Trabajo

La reformulación del problema, planteada en el paso anterior es usada para diseñar el plan de trabajo del estudio, a partir del cual se determina:

- La resolución temporal y espacial de los datos a recopilar para la evaluación de las variables: Dado el tipo de análisis a realizar se recomienda que la resolución temporal de la oferta se establezca con base en un registro histórico superior a 10 años, para una agregación diaria; en el caso de la demanda, dado que en la mayoría de los municipios no existe un sistema de información consolidado con base en registros históricos, la resolución temporal es menos exigente, pero a su vez el control de calidad de la información recopilada debe ser más cuidadoso, se requiere como máximo una agregación mensual para la demanda del sistema y a nivel anual para la demanda de la cuenca.
- Los protocolos asociados con la evaluación del riesgo a analizar y los niveles de error que serán aceptables durante la evaluación, de tal forma que se garantice que los resultados sean apropiados para el proceso decisional: dado que el análisis de riesgo se basa en las simulaciones con el Método de Monte Carlo los protocolos aplicados en la metodología serán los mismos que en dicho método; cuyo objetivo principal es el de caracterizar cualitativa y cuantitativamente la incertidumbre y variabilidad en la estimación del riesgo, además de identificar las fuentes que las generan tanto en los datos y estimativos como en los modelos a utilizar.
- Selección de las fuentes de información hidrológica y de demanda: En el caso de la oferta, se deben identificar las fuentes para la información especializada sobre las cuencas e hidrografía, la ubicación de las estaciones de monitoreo, las series históricas de tiempo y demás fuentes puntuales de información, para luego iniciar el proceso de recolección.
- Control de calidad de la información recopilada, con base en análisis estadísticos de la misma, que permitan identificar el nivel de incertidumbre asociado a los datos recopilados.
- Los procedimientos de análisis e interpretación para el procesamiento de los datos, la evaluación de las incertidumbres y las suposiciones asociadas a los mismos: Debido al tipo de riesgo a estimar, los procedimientos empleados consisten en su mayoría en análisis de analogía temporal, modelación dinámica y estocástica, y análisis de tendencia, para la caracterización estadística y probabilística de las variables analizadas.

Fase De Evaluación Del Riesgo

Consiste en la evaluación de los componentes del riesgo descritos con anterioridad, con base en el desarrollo del plan de trabajo:

Caracterización De La Amenaza

Una vez identificados los agentes amenazantes a considerar, se caracteriza la amenaza, así:

- Dado que una de las amenazas está constituida por la variabilidad intrínseca del régimen, esta etapa debe evaluarse sus condiciones actuales, las limitaciones para garantizar el régimen de estiaje, la protección de las fuentes frágiles y las demás demandas asociadas a la cuenca; a partir de esta información se define la Oferta Neta de la fuente al sistema y su régimen a la altura del punto de captación, así como las condiciones extremas del mismo.

Análisis De La Exposición:

Comprende las siguientes etapas:

Caracterización de la Exposición y sus efectos: En esta etapa del proceso se establece la curva de densidad probabilística frente a la acción de un agente amenazante en particular dadas unas condiciones iniciales del régimen, determinadas por la prehistoria de la fuente y la modelación de procesos no estacionarios mediante la solución de la ecuación de Fokker – Plank – Kolmogorov para un proceso markoviano simple, la cual es solucionada mediante la aplicación FPK Equation Solver.

Caracterización de los Elementos de presión sobre el sistema: Se establece la variación espacio - temporal de la demanda bruta del sistema de abastecimiento, a partir del cálculo de sus componentes: la demanda neta y la eficiencia del sistema, estableciendo escenarios de pérdidas en función de la normatividad vigente y las características propias del sistema analizado; a partir de los cuales se define el CAUDAL MÁXIMO DIARIO (QMD) de abastecimiento.

Este análisis debe llevarse para cada una de las fuentes abastecedoras que conformen el sistema de abastecimiento según las condiciones críticas del mismo, estimando la oferta y demanda correspondiente. Una vez se ha finalizado la estimación de los componentes del riesgo para las condiciones actuales y los diferentes escenarios de modelación f (agentes analizados y las pérdidas del sistema), sus componentes deben ser proyectados para el periodo de análisis considerado, a partir de los cuales se evalúa el riesgo para las condiciones futuras.

Caracterización Del Riesgo

Calculado la curva de densidad probabilística de la oferta neta para cada escenario de afectación y la demanda bruta asociada al sistema de abastecimiento, su integración se establece a partir de la caracterización del riesgo, en el cual se superponen los requerimientos de la demanda a nivel diario (QMD) y la curva de densidad probabilística para cada día, estableciendo sus valores críticos, así:

$$PF_i = p(Q(t) < DMD) = \int_0^{DMD} p(Q, t) dQ \quad (7)$$

Donde:

PF: Probabilidad de falla para el día i

Q(t): Afluencia neta al sistema para el día t

DMD: Demanda máxima diaria para el día i

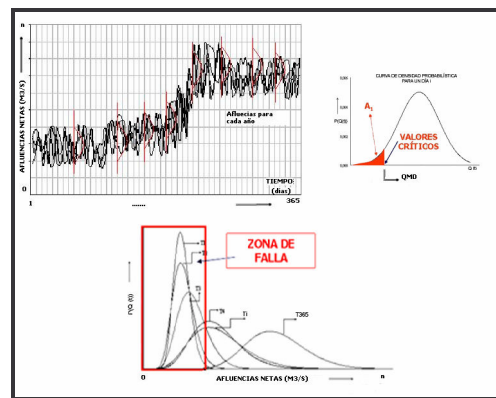
La probabilidad total de falla del sistema durante un año está dada por:

$$PTF = \int_{t=1}^{t=365} p(Q(t) < DMD) dt \quad (8)$$

Donde; PTF: Probabilidad total de falla, sumatoria de las sumas parciales de falla para cada día.

El esquema general para la caracterización del riesgo se resume en la Grafica 5.; como resultados de etapa de caracterización de riesgo se obtienen:

- Caracterización cualitativa y cuantitativa de los diferentes niveles de riesgo de desabastecimiento, estimados de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia de una falla en el sistema.
- Margen de seguridad y periodo de recurrencia de la falla del sistema, a partir de lo cual se pueden establecer las herramientas de apoyo para los administradores.
- Descripción del grado de incertidumbre y niveles de confianza inherentes a la evaluación del riesgo y sus interpretaciones.

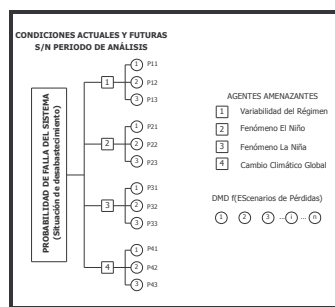


Grafica 5 - Caracterización del riesgo de desabastecimiento

Administración Del Riesgo

El alcance del presente proyecto se limita a presentar frente a los administradores del sistema los resultados y conclusiones del análisis (bajo los protocolos establecidos), necesarias para justificar los procesos de gestión de los mismos, con base en un árbol estocástico de decisiones.

En este árbol (Grafica 6), para cada fenómeno considerado (Cuadros 1...4) existen ramificaciones de posibles realizaciones de las afluencias según los diferentes escenarios de pérdidas considerados, los cuales son representados por círculos numerados de 1 hasta n., cada una de estas ramificaciones tiene una probabilidad asociada, obtenida de la curva de densidad probabilística pronosticada



Grafica 6 - Árbol de decisiones

Todos los análisis anteriormente descritos, se realizan a partir del seguimiento del marco metodológico, presentado en la Grafica 7.

ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO

A partir del desarrollo metodológico y conceptual planteado en los numerales anteriores, la evaluación está soportada sobre el análisis de las siguientes variables principalmente: la oferta de la fuente al sistema, la oferta de la cuenca, la demanda sobre la cuenca, la demanda del sistema y las pérdidas técnicas generadas por la operación del mismo.

Requerimientos De Información

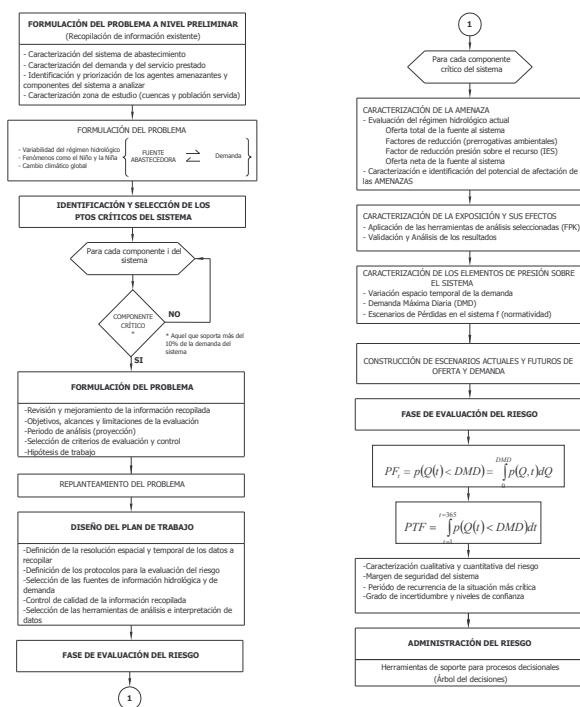
- La oferta, está basada por los datos proveídos por el IDEAM, las Corporaciones Autónomas Regionales y demás entidades que operen redes ambientales, su estimación se realiza siguiendo los mismos esquemas propuestos para el Índice de Escasez del IDEAM, solo que discriminando la oferta de la fuente al sistema y la oferta de la cuenca en general.

- La demanda en general constituida por las demandas sectoriales que se han enunciado en este documento, es proveída por las Corporaciones Autónomas Regionales, el Ministerio de Desarrollo, las Empresas Públicas, Sectores productivos, INAT y DANE principalmente. Teniendo en cuenta que se debe diferenciar entre la de demanda asociada al sistema, la cual es estimada con base en las consideraciones de la RAS 2000 (B.2.) y la demanda ligada a la cuenca, la cual es estimada con base en los escenarios de información propuestos por el Índice de Escasez propuesto del IDEAM, su caracterización para el modelo de evaluación debe basarse sobre estas consideraciones. Dado la dificultad actual para que cualquier sistema de abastecimiento pueda estimar sus pérdidas técnicas, como estrategia de modelación para incluirlas dentro de la evaluación, se toman los valores admisibles por la normatividad vigente (RAS 2000 – B.2.5.), los cuales pueden ser evaluados para un rango determinado, dependiendo de las condiciones y características de operación propias del sistema analizado.

Dominio Espacial Y Agregación Temporal

La evaluación de la relación oferta - demanda asociada al sistema de abastecimiento analizado, está limitado tanto por las cuencas abastecedoras como por la ubicación geográfica de la población servida por el mismo; por lo que el planteamiento del análisis dependiendo de

los objetivos del estudio, puede enfocarse de dos maneras: (1) Analizando el riesgo de desabastecimiento para todo el sistema, integrando tanto la oferta neta como la demanda y su relación, evaluando las condiciones de desabastecimiento para la totalidad del mismo. (2) Discriminando el análisis en función de las fuentes abastecedoras, analizando por separado la oferta y la demanda asociada a cada una, evaluando las condiciones de desabastecimiento por fuente.



Grafica 7 - Metodología de evaluación del Riesgo de Desabastecimiento en sistemas de abastecimiento de agua potable

La estimación de la oferta neta antes del sistema, se estima para el volumen de control limitado por la divisoria de aguas y el punto de toma del sistema, lo cual aplica tanto para los factores de reducción por régimen de estiaje como para el de protección de fuentes frágiles. Para estimar la presión sobre el sistema, se toma el volumen de control definido por la totalidad de la cuenca abastecedora, dadas las limitaciones de información que pueden surgir para aplicar este tipo de análisis a micro cuencas. En cuanto a la resolución temporal de la evaluación, teniendo en cuenta que los sistemas de abastecimiento de agua potable se encuentran captando continuamente de la fuente, tanto la oferta como la demanda del sistema deben ser calculadas como mínimo con una agregación diaria de caudales; para de esta forma obtener análisis representativos de las condiciones de desabastecimiento. Para el Índice de Escasez de la cuenca por su parte (factor de reducción por la presión sobre el sistema), se trabaja con una resolución anual, debido a la dificultad para estimar la demanda asociada a la cuenca de tipo agrícola y pecuario especialmente, con una agregación menor.

Proyección Del Riesgo De Desabastecimiento

En el marco temporal, la simulación pueden ser desarrollada en dos niveles: a corto plazo (mensual) usado para soportar la operación rutinaria del sistema y a largo plazo (más de

10 años) para la formulación de políticas de planeación contra fenómenos como el cambio climático global, entre otros.

A partir del análisis del régimen hidrológico de la fuente y de la solución de la ecuación de Fokker – Planck – Kolmogorov planteada a través de la aplicación “FPK – Equation Solver”, es posible pronosticar la Curva de Densidad Probabilística (CDP) de la fuente de interés, con base en la cual se estima el régimen proyectado de la fuente, frente a diferentes agentes amenazantes y escenarios de pérdidas.

Para el caso de la demanda relacionada con el sistema, dado que la mayoría de los sistemas de abastecimiento no cuentan con un registro histórico, que permita proyectarla bajo los criterios estadísticos de confiabilidad, se utiliza la información inter - censal del DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas) con base en la cual se define la tasa de crecimiento de la población analizada. Para la proyección de la demanda asociada a toda la cuenca abastecedora específicamente para los sectores pecuario, industrial, comercial y agrícola, se sigue el planteamiento metodológico planteado en el Índice de Escasez y el Estudio Nacional del Agua en el que la proyección se hace con el 3%, tomando como base la demanda potencial actual.

Limitaciones De La Metodología Propuesta

El fundamento conceptual de la metodología de evaluación se ha desarrollado con base en el modelo metodológico del IDEAM para el cálculo del Índice de Escasez de aguas superficiales y las consideraciones del reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico; sin embargo un aspecto que no pudo ser considerado en su totalidad fue la presión que sobre la fuente aguas abajo del sistema, las cuales inevitablemente limitan la disponibilidad de la oferta para el mismo en el punto de toma. En este sentido, como estrategia para su modelación se propuso el cálculo del Índice de Escasez asociado a la totalidad de la cuenca abastecedora, como factor de reducción de la oferta para el sistema. De acuerdo con lo anterior, el factor de reducción por la presión sobre la cuenca tiene idénticas limitaciones a las del índice de escasez, entre las cuales se destaca, el hecho que la metodología propuesta por el IDEAM, concierne solo al recurso hídrico superficial, por lo que en aquellos sistemas donde prevalece el recurso a partir de fuentes de agua subterráneas puede arrojar resultados contradictorios sobre la disponibilidad del agua en la fuente.

CONCLUSIONES

En general, un sistema de abastecimiento puede verse afectado por múltiples y variables fenómenos que amenazan su adecuada operación desde el punto de vista estructural y/o funcional; sin embargo dada la complejidad del análisis requerido para considerar dentro de una única evaluación todos los posibles eventos amenazantes y condiciones de la infraestructura, la presente metodología constituye un análisis simplificado de la problemática, enfocado en la evaluación del riesgo específico de desabastecimiento como consecuencia de la afectación de fenómenos de tipo hidrológico sobre las fuentes abastecedoras, cuyas condiciones críticas comprometen la finalidad del sistema de suministro de agua potable: satisfacer los requerimientos del recurso para la población servida.

Colombia es un país que en general se abastece "a filo de agua", por lo que bajo estos términos en condiciones críticas de alteración del régimen de caudales de las fuentes abastecedoras, representa un riesgo muy alto de desabastecimiento la presencia de fenómenos como el cambio climático global, el Frío y Cálido del Pacífico, lo que sumado a la

variabilidad hidrológica intrínseca de las mismas, hace necesario un seguimiento y control de las condiciones hidrológicas de la fuente para planificar el uso sostenible del recurso.

La propuesta metodológica aquí planteada está acorde con las tendencias actuales de análisis hidrológico, en las que la teoría de procesos estocásticos, ha generado herramientas para la resolución de evaluaciones hidrológicas que abarcan desde problemas de optimización hasta simples marcos descriptivos a través de la información registrada por las estaciones de monitoreo hidrológico. Utilizando aplicaciones como la solución de la ecuación de Fokker – Planck – Kolmogorov, a partir de la cual se puede pronosticar las curvas de densidad probabilística que representan las afluencias diarias al sistema de abastecimiento, su respectiva comparación con la demanda asociada al mismo establece los requerimientos necesarios de los procedimientos para la toma de decisiones en el sector de agua potable.

Adicionalmente, utilizando el mismo procedimiento de análisis es posible modelar escenarios hidrológicos generados por la acción de fenómenos como el cambio climático global, el Niño y la Niña, que también comprometen la funcionalidad del sistema; por lo que a partir de este tipo de evaluaciones se pueden y deben establecer procesos decisionales como los planteados en el siguiente esquema.

Dado que el sector socioeconómico analizado corresponde específicamente a los sistemas de abastecimiento de agua potable, la metodología ha sido propuesta conforme al enfoque planteado por el Reglamento técnico del sector de Agua potable y Saneamiento básico (RAS 2000), considerando los parámetros establecidos por el mismo tanto para el análisis de las fuentes, como para la estimación de las pérdidas y la demanda servida del sistema.

Pese que dentro del enfoque de la evaluación no es considerada la infraestructura del sistema, el hecho de considerar como factor limitante de la oferta ofrecida por la fuente al sistema, los requerimientos de la población incluidas las pérdidas generadas en el mismo, incluye de manera indirecta las condiciones de la infraestructura propia del sistema (reflejadas en su eficiencia).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Domínguez. C, *El Papel Del Pronóstico De Curvas De Densidad Probabilística Para Afluencias En Un Nuevo Enfoque Para La Evaluación De Riesgos*, Iahs Scientific Assembly, 2004.
- Domínguez. C, *Aplicación De La Ecuación De Fokker – Planck – Kolmogorov Para El Pronóstico De Afluencias A Embalses Hidroeléctricos* (Caso Práctico De La Represa De Betania). Meteorología Colombiana N° 8. Marzo De 2004.
- Domínguez. C, *Hydrological Scenarios Modeling For Climate Change Conditions Using The Fokker – Planck – Kolmogorov Equation*, Pub Universidad De Brasilia, 2004.
- Rivera, Hebert. Domínguez, Efraín. Marín, Rodrigo. Vanegas. Raquel. (Versión Vigente 2005) *Metodología De Cálculo Del Índice De Escasez*, Ideam.