
ANÁLISIS DE PELIGROS Y PUNTOS CRÍTICOS DE CONTROL EN PLANTAS CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE AGUA

ANDREA PÉREZ-VIDAL, LUIS GERMÁN DELGADO-CABRERA,
JUAN CARLOS ESCOBAR-RIVERA, CAMILO HERNÁN CRUZ-VÉLEZ y
PATRICIA TORRES-LOZADA

RESUMEN

El sistema de análisis de peligros y puntos críticos de control (APPCC) es una herramienta de amplio uso en la industria de alimentos y recomendada en el enfoque de los planes de seguridad del agua (PSA). En este estudio se adaptó una propuesta metodológica aplicable a los procesos de tratamiento de agua que integró los principios del sistema APPCC y los PSA. El estudio se realizó en una planta convencional de potabilización (PTA) en la ciudad de Cali, Colombia, y comprendió dos etapas: 1) identificación de peligros y eventos peligrosos, y 2) determinación de puntos críticos de control (PCC) y puntos de atención (POA). En la primera etapa se caracterizó el agua cruda, clari-

ficada, filtrada y tratada mediante diez jornadas de muestreo y caracterización, en un periodo de 18 meses. En la segunda etapa se adaptó un árbol de decisión que fue aplicado en los eventos peligrosos categorizados en nivel de riesgo medio o superior. Se identificaron un total de 40 eventos peligrosos, 26 PCC y 10 POA, encontrándose como principales PCC las fases de coagulación, floculación/clarificación, filtración y desinfección. La determinación de los PCC contribuyó a la priorización de las fases del tratamiento que requieren de la ejecución de planes de mejoramiento o soporte definidos en los PSA, resultando prioritarios la captación, canales y tuberías de conducción.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) promueve la aplicación de los planes de seguridad del agua (PSA) como estrategia de aseguramiento de la calidad de agua y protección de la salud

pública a través de la minimización de la contaminación en la cuenca de abastecimiento, la eliminación o reducción de contaminantes durante los procesos de tratamiento y la prevención de la contaminación en el sistema de distribución y

conexiones intradomiciliarias. Este enfoque se fundamenta en los conceptos de la evaluación y gestión del riesgo, los principios de barreras múltiples y el sistema de análisis de peligros y puntos críticos de control (APPCC; WHO, 2011).

PALABRAS CLAVE / Agua potable / Gestión de riesgos / Plan de Seguridad del Agua / Puntos Críticos de Control / Tratamiento de agua /

Recibido: 20/04/2017. Modificado: 12/01/2018. Aceptado: 16/01/2018.

Andrea Pérez-Vidal. Ingeniera Sanitaria. Maestría y Doctorado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, Colombia. Docente, Universidad Santiago de Cali, Colombia. Dirección: Facultad de Ingeniería, Universidad Santiago de Cali. Calle 5 # 62-00 Barrio Pampalinda, Ed. 1 Piso 3, Cali, Colombia. e-mail: andrea.perez00@usc.edu.co

Luis German Delgado-Cabrera. Ingeniero Sanitario. Jubilado, Empresas Municipales de Cali (EMCALI EICE ESP), Colombia. e-mail: lgdelca@gmail.com

Juan Carlos Escobar-Rivera. Ingeniero Sanitario. Maestría y Doctorado en Ingeniería Civil: Hidráulica y Saneamiento, Universidad de São Paulo (USP), Brasil. Profesional Operativo, Empresas Municipales de Cali (EMCALI EICE ESP), Colombia. e-mail: jcescobar@emcali.com.co

Camilo Hernán Cruz-Vélez. Ingeniero Sanitario. Maestría en Ingeniería Civil: Hidráulica y Saneamiento, USP, Brasil. Profesor, Universidad del Valle, Colombia. e-mail: camilo.cruz@correounivalle.edu.co

Patricia Torres-Lozada. Ingeniera Sanitaria. Maestría y Doctorado en Engenharia Civil: Hidráulica e Saneamento, USP, Brasil. Profesora, Universidad del Valle, Colombia. e-mail: patricia.torres@correounivalle.edu.co

El sistema APPCC es un acercamiento sistemático para la identificación, evaluación y control de peligros que se centra en la prevención y no solo en el producto final. Fue desarrollado en 1960 para asegurar la calidad sanitaria y seguridad microbiológica de los alimentos utilizados en los programas espaciales de la NASA (*National Aeronautic and Space Administration*) y reconocido por la OMS y la FAO (*Food and Agriculture Organization*) como una metodología eficaz para la gestión del riesgo en la producción de alimentos (EPA, 2006; Moran *et al.*, 2017).

Este enfoque preventivo fue descrito inicialmente por Havelaar (1994) y ha sido aplicado en los sistemas de abastecimiento de agua potable (SAAP) desde mediados de los años 90 (EPA, 2006). La aplicación sistemática de los principios del APPCC asegura el control de los riesgos tan cerca de su origen como sea posible, permitiendo intervenir en el SAAP antes que el agua sea distribuida al consumidor (Dewettinck *et al.*, 2001; Yokoi *et al.*, 2006; Jayaratne, 2008).

El sistema APPCC consta de cinco etapas preliminares: conformación equipo de trabajo, descripción del producto, identificación de usos, elaboración del diagrama de flujo y validación (EPA, 2006) y siete principios: análisis de peligros, determinación de puntos críticos de control (PCC), establecimiento de límites críticos, definición de un sistema de monitoreo, definición de medidas correctivas, establecimiento de procedimientos de verificación y/o validación y establecimiento de un sistema de documentación y registro (Damikouka *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2010; Moran *et al.*, 2017).

Existen cuatro criterios o preguntas claves que pueden orientar la determinación de los PCC (Ropkins y Beck, 2000) y que constituyen el fundamento del árbol de decisiones, herramienta comúnmente empleada para la identificación de los PCC (Wang *et al.*, 2010): 1) ¿En cuál(es) fase(s) el peligro identificado puede ocurrir o desarrollarse a un nivel inaceptable? 2) ¿Existen medidas de control para el peligro identificado y en qué fase podrían ser empleadas? 3) ¿En cuál(es) fase(s) puede ser controlado de forma efectiva el peligro identificado? 4) ¿Alguna fase o actividad ha sido específicamente diseñada para eliminar o reducir el peligro identificado a un nivel aceptable?

Países como Australia, Francia e Islandia han implementado el sistema APPCC en sus SAAP (Damikouka *et al.*, 2007; Gunnarsdottir y Gissurason,

2015; Monis *et al.*, 2018) y Singapur lo hace desde 2006 (Chit-Pin y See, 2008). Regiones como Celje en Eslovenia cuentan con la asesoría y el apoyo técnico del Instituto de Salud Pública para su implementación (Ursic y Ursic, 2008) y legislaciones internacionales como las de Australia, Canadá, Nueva Zelanda, Francia e Islandia lo han incorporado como estrategia para asegurar la calidad del agua potable (EPA, 2006; Gunnarsdottir y Gissurason, 2008; 2015). Existen, además, experiencias de aplicación de los principios del APPCC para identificar fallas en plantas de tratamiento de agua en el sur de África (Okeyo *et al.*, 2011) y en Latinoamérica se conoce la experiencia de Durães (2007) en Brasil.

Esta investigación se orientó hacia la aplicación y adaptación del sistema APPCC articulado con la metodología de los PSA, en una planta de tratamiento de agua potable (PTA) de Cali, Colombia, que abastece a $\sim 1,4 \times 10^6$ habitantes y cuenta con tecnología de tratamiento convencional (coagulación, floculación, clarificación, filtración, desinfección y ajuste de pH), además de tratamientos complementarios (adsorción con carbón activado y precloración). La PTA cuenta con una capacidad instalada de $6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y usa como fuente de abastecimiento el río Cauca, uno de los principales recursos hídricos del país (Pérez *et al.*, 2012).

Materiales y Métodos

Considerando los principios del sistema APPCC y los de PSA, la investigación se estructuró en dos etapas: 1) identificación de peligros y eventos peligrosos; y 2) determinación de puntos críticos de control (PCC) y puntos de atención (POA). Como actividad previa se elaboró el diagrama de flujo de la PTA, clasificando las fases y componentes del sistema con base en la simbología sugerida por WHO (2008) y Bartram *et al.*, (2009) para los PSA (Tabla I).

Identificación de peligros y eventos peligrosos

La PTA evaluada capta agua del río Cauca y cuenta con pretratamiento conformado de rejillas gruesas y finas, tamizado y dos unidades de desarenación. La primera barrera de tratamiento frente a contaminantes orgánicos, es la dosificación de carbón activado en polvo (CAP) antes de la desarenación; posteriormente el agua es conducida a dos cámaras de distribución de caudales

donde ocurre la precloración, seguida de la adición del coagulante (Al_2SO_4 o FeCl_3). El agua coagulada se distribuye en cuatro reactores de mantos de lodos donde tienen lugar la floculación y la clarificación, cuya agua se distribuye en 24 filtros rápidos de arena y antracita. Finalmente, el agua es sometida a los procesos de poscloración y acondicionamiento químico con cal.

Se caracterizó el agua cruda, clarificada, filtrada y tratada en la PTA mediante diez muestreos puntuales durante un periodo de 18 meses. Se midieron variables fisicoquímicas (pH, alcalinidad total, turbiedad, color aparente, carbono orgánico total, hierro total, cloro residual) y microbiológicas (bacterias heterotróficas, *E.coli*, estreptococos fecales y *Clostridium perfringens*; APHA-AWWA-WEF, 2012) y se calculó el índice de agresividad (IA) en el agua tratada (EPA, 1984).

El equipo responsable de los PSA contó con la multidisciplinariedad, experiencia y conocimientos adecuados para la identificación de peligros (Wallace *et al.*, 2014) y estuvo conformado por personal técnico de la planta (Jefe de producción y operadores), asesores externos e investigadores del sector académico. Con el apoyo de este equipo y considerando los resultados de los monitoreos de calidad de agua e información secundaria (Pérez *et al.*, 2016), se identificaron los peligros y eventos peligrosos como recomendando los PSA (Bartram *et al.*, 2009). Adicionalmente, se realizó la estimación del riesgo sin y con medidas de control, lo que permitió clasificar los eventos peligrosos en niveles de riesgo bajo, medio, alto y muy alto.

Determinación de puntos críticos de control (PCC) y puntos de atención (POA)

La aplicación del árbol de decisión se concentró en los eventos peligrosos clasificados con nivel de riesgo medio o superior, también denominados 'puntos de control' (Vieira y Morais, 2005) o 'puntos críticos' (Durães, 2007), omitiendo los eventos con bajo riesgo, como lo sugiere FAO (2002). Adicionalmente, se incorporó el concepto de 'punto de atención' (POA; Dewettinck *et al.*, 2001) y se adaptó el árbol o diagrama de decisiones mostrado en la Figura 1.

La identificación de los PCC y POA facilitó la priorización de medidas de control, medidas correctivas y planes de mejoramiento o soporte, conforme la metodología PSA, sirviendo de instrumento de gestión y apoyo a la empresa prestadora del servicio de agua.

TABLA I
SIMBOLOGÍA EMPLEADA EN LOS PSA PARA EL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

Símbolo	Definición del símbolo
○	<i>Operación</i> : indica una operación o grupo de operaciones que dan como resultado un cambio intencional en el agua
□	<i>Inspección</i> : representa inspección o decisión, por ejemplo el monitoreo o verificación de la calidad del agua
▽	<i>Almacenamiento</i> : cuando el agua es almacenada
→	<i>Transporte</i> : cuando el agua es transportada de un lugar a otro
◻	<i>Actividad combinada</i> : indica actividades realizadas al mismo tiempo o por el mismo operador en el mismo lugar. Este símbolo indica actividades combinadas de operación e inspección
-----▶	Proceso intermitente
————▶	Proceso continuo

La letra cursiva indica que la empresa prestadora del servicio de agua tiene control directo. Adaptado de WHO (2008) y Bartram *et al.* (2009).

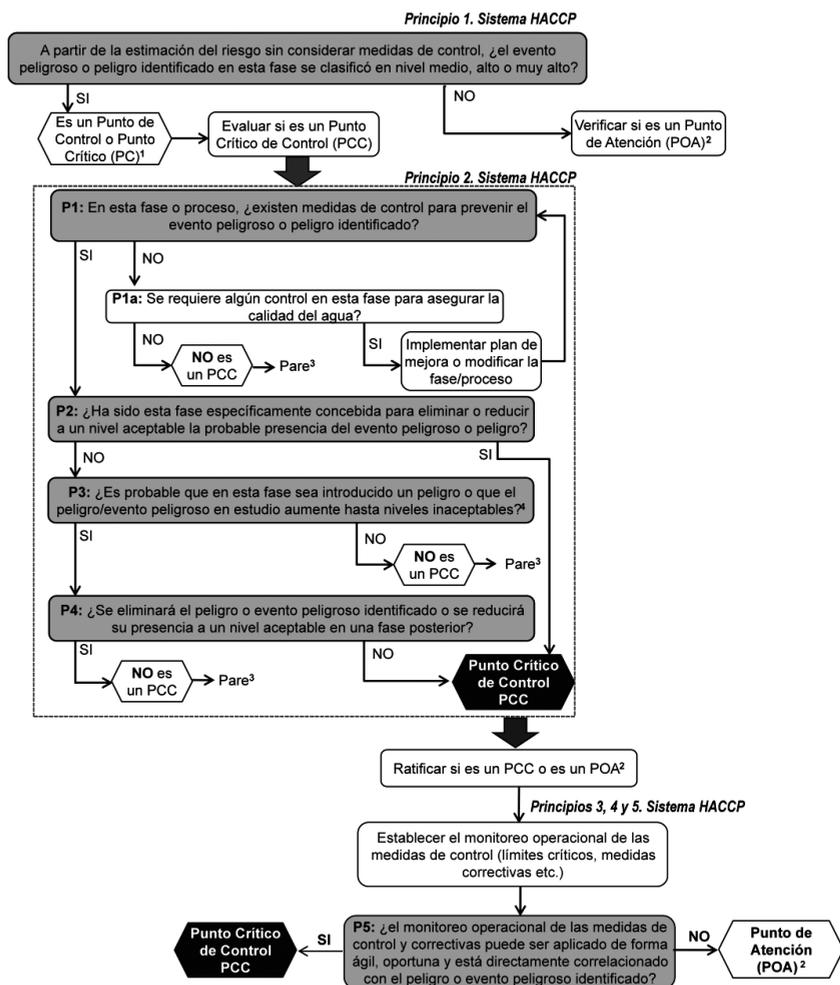


Figura 1. Árbol de decisión adaptado para seleccionar los PCC en los procesos de tratamiento.

¹ Punto de control: elemento del sistema en el que se identifica un peligro/evento peligroso y es clasificado con nivel de riesgo medio o superior (Vieira y Morais, 2005). Punto crítico: fase susceptible del proceso donde puede ocurrir, persistir o incrementarse un peligro/evento peligroso y puede ser corregido/controlado convirtiéndose en un PCC (Duraes, 2007).

² POA: corresponde a una actividad, factor o fase que también requiere ser controlada pero no en la misma forma imperativa que un PCC (Dewettinck *et al.*, 2001) y se diferencia de éste por la forma de monitoreo. Un PCC debe ser monitoreado de forma ágil, rápida, con adecuada frecuencia (ej. monitoreo on line, parámetros físicos como turbiedad etc.), además las acciones correctivas pueden ponerse en marcha de forma inmediata, de lo contrario puede considerarse un POA (Duraes, 2007).

³ Verificar si es un POA y proceder con el evento peligroso o peligro de la siguiente fase del proceso. ⁴ La pregunta se orienta hacia la posibilidad que se incorporen contaminantes al agua durante la fase analizada o se incremente la concentración de estos al punto de constituirse en un peligro. (Ej. contaminantes en materias primas, multiplicación de microorganismos, formación de subproductos de desinfección) (adaptado de FAO, 2002; Torres, 2009).

Resultados y Discusión

Identificación de peligros

El río Cauca, como fuente de abastecimiento, viene presentando un progresivo deterioro ambiental y presencia de peligros químicos, físicos y biológicos derivados de los diferentes usos del suelo que han obligado a la entidad prestadora del servicio de agua a implementar medidas de control y correctivas a fin de reducir los potenciales riesgos asociados a la calidad y cantidad del agua (Pérez *et al.*, 2016). Entre las medidas de control implementadas en la PTA, se destaca la puesta en marcha, desde el año 2009, de un reservorio de agua clarificada con capacidad de 80.000m³, usado para mitigar los impactos por la suspensión del servicio de agua durante los eventos de elevada carga contaminante (oxígeno disuelto en el río <3,0mg·l⁻¹) y para su uso combinado con agua cruda durante eventos extremos de turbiedad (Montoya *et al.* 2011; Pérez *et al.*, 2016).

La Tabla II muestra los resultados obtenidos en los monitoreos realizados en el estudio, observándose que independiente de la calidad del agua cruda, se logra una reducción y/o eliminación de los peligros fisicoquímicos y microbiológicos presentes en el agua cruda, lo que ha permitido el cumplimiento de la reglamentación colombiana para agua potable en 99,4% del tiempo, como también lo indican Pérez-Vidal *et al.*, (2012).

Durante el tratamiento se observó una considerable disminución del pH y la alcalinidad total del agua debido a las reacciones que ocurren durante el proceso de coagulación, lo que a su vez repercute en las características agresivas del agua tratada, como lo indicó el IA, que presentó valores entre 11,16 y 9,23 (moderadamente agresiva entre 10 a 12 y muy agresiva si es <10; EPA, 1984).

La turbiedad, un indicador de rápida y fácil interpretación usado

TABLA II
RESULTADOS DE LOS MONITOREOS DE CALIDAD DE AGUA A LO LARGO DEL TREN DE TRATAMIENTO

Variable	Unidades	Agua cruda	Agua clarificada	Agua filtrada	Agua tratada		
					Valor	Límite reglamentario*	
pH	-	M	7,19	6,13	6,14	7,43	6,5-9,0
		DS	0,4	0,6	0,3	0,6	
		Min	6,75	5,51	5,57	6,7	
		Max	7,96	7,29	6,7	8,39	
Alcalinidad total	mg ⁻¹	M	31,85	9,04	8,16	21,2	200
		DS	7,6	6,3	4,1	9,1	
		Min	20,8	1,5	2,99	11,73	
		Max	43,47	18,9	16,3	39,69	
Turbiedad	UNT	M	162,48	3,23	0,54	0,33	2,0
		DS	79,3	2,9	0,3	0,2	
		Min	24,1	1,14	0,22	0,15	
		Max	291,5	10,6	0,96	0,651	
Color aparente	PtCo	M	821,67	28	7,3	2,8	15
		DS	510,7	15,9	6,7	3,6	
		Min	160	4	0	0	
		Max	1623	65	18	11	
Carbono Orgánico Total	mg ⁻¹	M	3,61	1,91	1,93	0,83	5,0
		DS	2,0	0,9	0,5	0,5	
		Min	0,2	0,5	1,1	0,182	
		Max	6,97	3,4	2,4	1,8	
Hierro total	mg ⁻¹	M	5,44	0,33	0,02	0,11	0,3
		DS	6,1	0,2	0,019	0,3	
		Min	1,26	0,15	0	0	
		Max	19,8	0,57	0,05	0,85	
Cloro residual	mg ⁻¹	M	N/A	0,68	0,50	1,53	0,3-2,0
		DS	N/A	0,4	0,4	0,2	
		Min	N/A	0,07	0,03	1,21	
		Max	N/A	1,27	1,32	1,95	
Bacterias Heterotróficas	UFC/100ml	M	2,6x10 ⁷	6,5x10 ¹	4,0x10 ¹	1x10 ¹	100
		Min	6,0x10 ⁶	1,6x10 ¹	1,0x10 ¹	0	
		Max	5,6x10 ⁷	1,3x10 ³	7,1x10 ¹	3,0x10 ¹	
<i>E. coli</i>	UFC/100ml	M	3,5x10 ⁴	0	0	0	0
		Min	3,0x10 ³	0	0	0	
		Max	9,2x10 ⁴	0	0	0	
Estreptococos fecales	NMP/100ml	M	5,1x10 ⁴	4,1x10 ¹	0	0	-
		Min	1,3x10 ³	0	0	0	
		Max	1,6x10 ⁵	2,0x10 ²	0	0	
<i>Clostridium perfringens</i>	UFC/100ml	M	15750	30,3	0	0	-
		Min	0	0	0	0	
		Max	85000	300	0	0	

M: media, DS: desviación estándar, Min: mínimo, Max: máximo.

*Resolución 2115 del 2007 por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. República de Colombia.

para evaluar la eficacia de la filtración en la remoción de quistes de protozoos (Upton

et al., 2017; Monis et al., 2018), mostró una considerable reducción en los clarificadores

de manto de lodos, lográndose valores cercanos a 2,0 UNT en el agua clarificada y 0,3 UNT en el agua filtrada, valores recomendados para el adecuado funcionamiento de los filtros y remoción de protozoos (Betancourt y Rose, 2004).

Otros parámetros, tales como color aparente, hierro total, carbono orgánico y cloro residual también mostraron el total cumplimiento de la reglamentación colombiana. Con relación a las variables microbiológicas, se observó que la coagulación es una fase esencial que, en combinación con las siguientes fases del tratamiento convencional, logra una considerable reducción de la carga microbiana, principalmente a partir de la clarificación, alcanzando la eliminación total de *E.coli*, estreptococos fecales y *Clostridium perfringens* en el agua tratada y el cumplimiento de la reglamentación en términos de bacterias heterotróficas.

A partir del análisis integral de los datos del monitoreo, de información secundaria y del soporte del equipo PSA, se identificaron 40 eventos peligrosos para las diferentes fases de la PTA (Tabla III). Se diferenciaron los tipos de peligros físicos, químicos, biológicos y los relacionados con insuficiencia de agua o daños en la infraestructura física.

La estimación del riesgo permitió identificar que el 60% de los eventos peligrosos, sin considerar medidas de control, se clasificaron en riesgo muy alto y el 35% en riesgo alto. Considerando las medidas de control existentes en la PTA, el nivel y magnitud del riesgo de los eventos con riesgo muy alto se redujeron considerablemente a un 7,5% (Tabla IV), encontrándose que los eventos peligrosos 28, 31 y 33 son los que requieren reforzar de manera prioritaria las medidas de control existentes o implementar nuevas medidas.

Determinación de puntos críticos de control (PCC)

Aunque el árbol de decisión se aplicó en los 37 eventos peligrosos clasificados en un nivel de riesgo medio o superior, se verificó si los tres eventos clasificados en riesgo bajo podían ser considerados puntos de atención (Vieira y Morais, 2005) los cuales se identificaron como POA3, POA7 y POA8 respectivamente. La Tabla V muestra los resultados obtenidos en la aplicación del árbol de decisión para determinar los PCC y los POA y en la Figura 2 se ubican los PCC y POA sobre el diagrama de flujo de la PTA objeto de estudio.

Se identificaron 26 PCC, parte de los cuales coincidieron con Vieira y

TABLA III
LISTADO DE EVENTOS PELIGROSOS IDENTIFICADOS EN CADA FASE O
COMPONENTE DE LA PLANTA DE PUERTO MALLARINO

Fase del proceso	Evento peligroso	Fase del proceso	Evento peligroso	
1. Captación y estructuras	1. Presencia de obstáculos físicos (flotantes, material de arrastre, sedimentos, barro y residuos, etc.) que pueden afectar la captación y estructuras.	8. Filtración	21. Incorrecta operación de los filtros.	
	2. Eventos extremos de turbiedad (> 2500 UNT).		22. Deficiente lavado de los filtros.	
	3. Elevada contaminación orgánica de la fuente (Oxígeno disuelto-OD menor o igual a 3.0 mg/L).		23. Falla en procesos anteriores a la filtración (precloración, coagulación y floculación/decantación) que causan mala calidad del afluente.	
	2. Reservorio agua clarificada	4. Reducción del caudal del río por largos periodos de sequía.	9. Postcloración	24. Insuficiente tiempo de contacto del cloro con el agua.
		5. Aumento considerable del nivel de agua del río (> 10,3 metros) ocasionando inundaciones.		25. Inadecuada concentración de cloro residual.
		6. Rotura del Jarillón o dique (barrera de tierra construida a orillas del río Cauca para evitar inundaciones o desbordamiento).		26. Aporte de contaminantes al agua por su presencia en la materia prima (Cloro) que impide su uso.
		7. Variación atípica de características fisicoquímicas del agua del río Cauca por descargas contaminantes puntuales.		27. Inadecuada remoción de materia orgánica antes de la aplicación del cloro.
3. Pretratamiento (desarenación y tamizaje)	8. No disponibilidad del reservorio por fallas operativas o de mantenimiento, agotamiento de capacidad, vandalismo etc.	10. Acondicionamiento químico	28. Ajuste incorrecto del pH (inadecuado acondicionamiento químico del agua tratada).	
	9. Contaminación del agua del reservorio por animales, crecimiento algal, vandalismo, etc.		29. Inadecuada calidad de la materia prima (Cal).	
	10. Rebose del reservorio por fallas operativas.		30. Fugas o rotura de la tubería de agua cruda; acumulación de sólidos y sedimentos; formación de biopelículas e incrementos puntuales de contaminación por desprendimiento de las mismas.	
4. Adsorción con CAP	11. Obstrucción de los tamices.	11. Canales y tuberías	31. Fugas o rotura de la tubería de refuerzo de agua cruda a la planta Río Cauca.	
	12. Falla en el funcionamiento de tamices (problemas electromecánicos, sismos etc.).		32. Fugas y roturas de las tuberías de agua desarenada.	
5. Precloración	13. Deficiente funcionamiento del sistema de desarenación.		33. Fugas y roturas de las cuatro tuberías de agua coagulada.	
	14. Dosificación inadecuada de carbón activado. Ineficiencia del proceso de Adsorción.		34. Fugas y roturas en las tuberías de agua clarificada hacia las baterías de filtración.	
6. Coagulación	15. Dosificación inadecuada de cloro gaseoso (exceso o deficiencia).		35. Fugas y roturas en las tuberías de entrada y salida del reservorio.	
	16. Escape o fugas de cloro en las instalaciones de la planta o durante su transporte desde el proveedor.		36. Fugas y roturas en las tuberías de consumo interno de la planta.	
7. Floculación/Clarificación	17. Aporte de contaminantes al agua por su presencia en la materia prima (Cloro).		37. Contaminación de las tuberías de consumo interno por conexiones erradas.	
	18. Fallas en el proceso de coagulación por inadecuada: *distribución del caudal de agua, *dosificación de coagulante y ayudantes de coagulación/floculación, *pH de coagulación, *gradiente y tiempo de mezcla, *calidad de la materia prima.	38. Fugas y roturas de las tuberías de agua tratada (tuberías de transmisión sur, norte y oriental) al interior de la planta.		
	19. Inadecuada calidad del agua clarificada (Turbiedad > 5UNT) causada por pérdida del manto de lodos, recirculación y purga inadecuadas, corrientes de densidad, fallas en el proceso de coagulación etc.	39. Fallas en las estaciones de bombeo de agua cruda y tratada de la planta.		
	20. Inadecuada aplicación de ayudantes floculación.	12. Estaciones Bombeo	40. Falla en la estación de bombeo de aguas residuales que adicionalmente evacua aguas lluvias y aguas de lavado de filtros.	

Morais (2005) y Okeyo *et al.* (2011), quienes muestran que desde la captación hasta el final del tratamiento debe hacerse seguimiento continuo de la eficacia de las medidas de

control, garantizando prevenir, reducir o eliminar los riesgos asociados a cada PCC.

Las fases en las que se encontraron los principales PCC fueron la

coagulación, floculación/clarificación, filtración y desinfección, coincidiendo con Damikouka *et al.* (2007), quienes identificaron los principales PCC en la

floculación, filtración y desinfección. Havelaar (1994) también consideró el bloque coagulación/floculación/clarificación/filtración como un típico e importante PCC.

Con relación a los POA, éstos resultan de gran importancia como instrumento de control desde el punto de vista de salud pública, ya que a diferencia de la industria alimenticia que puede retirar productos defectuosos antes de su distribución, en la producción de agua potable ello no es factible por su carácter continuo. En este estudio se identificaron 10 POA y se evidenció la importancia de ratificar el resultado de la aplicación del árbol de decisión respondiendo la pregunta 5, lo que permitió reclasificar cuatro PCC como POA en la fase de captación/estructuras (POA4) y el componente de canales/tuberías (POA 9,11 y 12).

El cierre de la captación como única medida de control no es suficiente para constituir la captación como

TABLA IV
CLASIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN
DEL NIVEL DE RIESGO SIN
Y CON MEDIDAS DE CONTROL

Eventos peligrosos	Nivel de riesgo				Total
	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	
Sin medidas de control	24	14	2	0	40
Con medidas de control	3	19	15	3	40

un PCC (Havelaar, 1994). En la PTA evaluada, además de esta medida, se cuenta con una estación de alerta temprana ubicada a 2km aguas arriba con medición en línea de turbiedad y oxígeno disuelto y un reservorio de agua clarificada (Pérez *et al.*, 2012), lo que permitió identificar un evento como PCC y los restantes como POA.

Los eventos clasificados como POA se debieron a que el monitoreo operacional, principalmente para peligros microbiológicos, no es lo suficientemente oportuno para reducir el riesgo. Adicionalmente, algunas medidas correctivas no garantizan que se retome el control del proceso de forma rápida y las fases posteriores del tratamiento pueden eliminar o reducir la mayoría de los peligros identificados a niveles aceptables.

En general, la aplicación del árbol de decisión permitió evidenciar que más de un peligro puede ser controlado con una misma medida de control y que más de una fase del proceso puede estar involucrada en el control de un determinado peligro (Vieira y Morais, 2005). Se encontraron algunos eventos peligrosos que actualmente no cuentan con medidas de control, por lo que el resultado final del árbol de decisión mostró que debe implementarse un plan de mejora o modificarse las fases,

TABLA V
IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DE CONTROL EN LA PLANTA

Fase / Componente del proceso	Peligro	Evento peligroso asociado	Árbol de decisión						Punto crítico de control PCC	Punto de atención POA	
			P1	Pla	P2	P3	P4	P5			
1. Captación y estructuras	B, Q, F, C, Inf	1	Si	-	No	Si	No		PCC1	-	
		2, 3	Si	-	No	Si	Si	-	No	POA1, POA2	
		4	-	-	-	-	-	-	-	-	POA3
		5	Si	-	No	Si	No	No	-	-	POA4
		6	No	Si	-	-	-	-	-	Plan de mejora o modificar fase	-
		7	Si	-	No	Si	Si	-	-	No	POA5
2. Reservorio agua clarificada	B, Q, F, C, Inf	8, 10	Si	-	Si	-	-	Si	PCC2, PCC3	-	
		9	Si	-	No	Si	Si	-	No	POA6	
3. Pretratamiento (desarenación y tamizaje)	B, Q, F, C, Inf	11	-	-	-	-	-	-	-	POA7	
		12	Si	-	No	Si	No	Si	PCC4	-	
		13	Si	-	Si	-	-	Si	PCC5	-	
4. Adsorción con CAP	Q, F	14	Si	-	Si	-	-	Si	PCC6	-	
5. Precloración	B, Q, F, C, Inf	15	Si	-	Si	-	-	Si	PCC7	-	
6. Coagulación	B, Q, F	16, 17	Si	-	No	Si	No	Si	PCC8, PCC9	-	
7. Floculación/ clarificación	B, Q, F, C, Inf	18	Si	-	Si	-	-	Si	PCC10	-	
8. Filtración	B, F, Q, C, Inf	19, 20	Si	-	Si	-	-	Si	PCC11, PCC12	-	
		21, 23	Si	-	Si	-	-	Si	PCC13, PCC14	-	
		23	Si	-	No	Si	No	Si	PCC15	-	
9. Postcloración	B,Q	24	-	-	-	-	-	-	-	POA8	
		25	Si	-	Si	-	-	Si	PCC16	-	
		26,27	Si	-	No	Si	No	Si	PCC17, PCC18	-	
		28	Si	-	Si	-	-	Si	PCC19	-	
10. Acondicionamiento químico	B, Q, F, Inf	39	Si	-	No	Si	No	Si	PCC20	-	
		30, 33, 37	Si	-	No	Si	No	No	-	POA9, POA11, POA12	
		31	No	Si	-	-	-	-	Plan de mejora o modificar fase	-	
11. Canales y tuberías	B, Q, F, C, Inf	32	Si	-	No	Si	Si	-	No	POA10	
		34, 35, 36, 38	Si	-	No	Si	No	Si	PCC21, PCC22, PCC23, PCC24	-	
12. Estaciones Bombeo	B, Q, F, C, Inf	39, 40	Si	-	No	Si	No	Si	PCC25, PCC26	-	

B: biológico, Q: químico, F: físico, C: insuficiencia de agua por cantidad o continuidad, Inf.: daño o falla en infraestructura física.

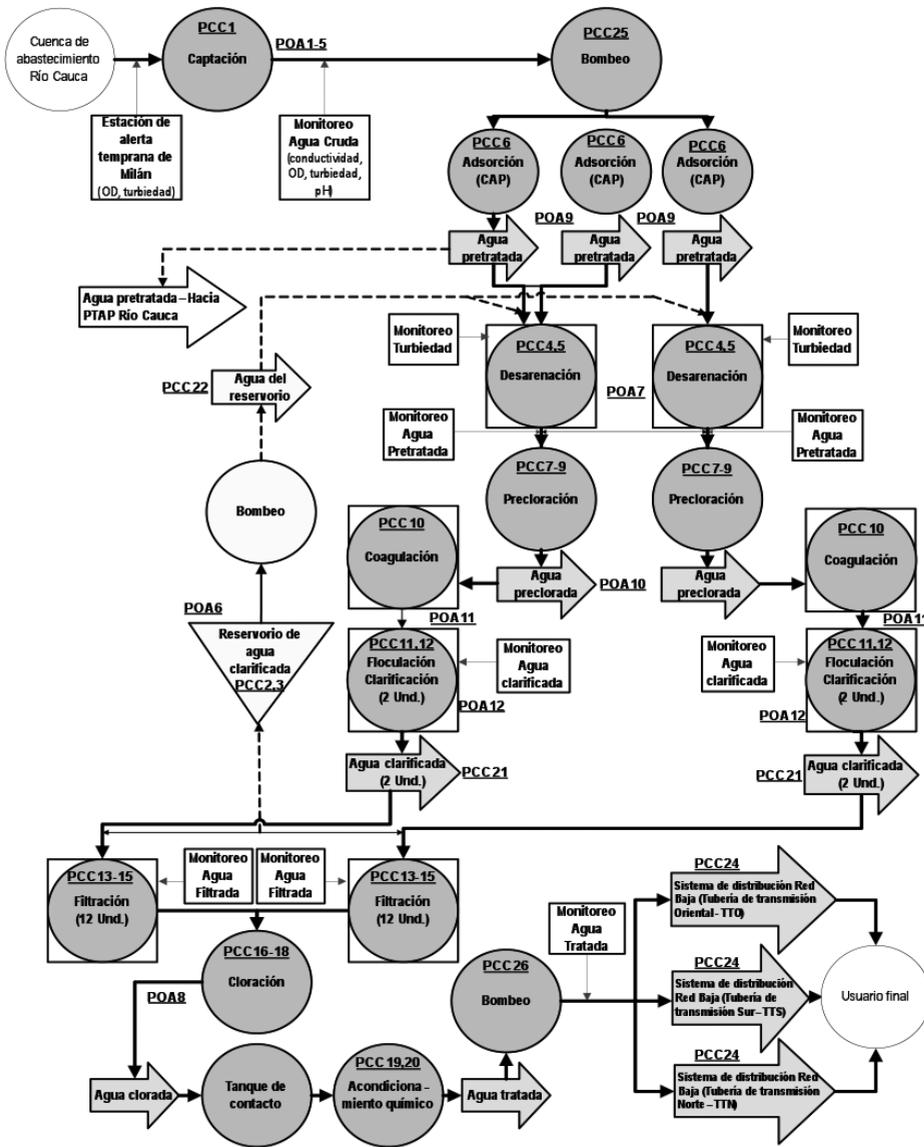


Figura 2. Ubicación de PCC y POA sobre el diagrama de flujo de la planta Puerto Mallarino.

principalmente en la captación y sus estructuras y en el componente de tuberías y canales de la PTA objeto de estudio.

La identificación de los PCC puede ser aplicada en los diferentes componentes del SAAP, siendo de gran utilidad en los procesos de tratamiento y el sistema de distribución por estar usualmente bajo la gobernabilidad de la empresa prestadora del servicio de agua (EPA, 2006; Havelaar 1994; Durães, 2007). La determinación de los PCC sirvió de herramienta para priorizar las fases del tratamiento que requieren ser controladas para asegurar la calidad del agua potable y hacia las cuales se deben orientar los esfuerzos y recursos para la ejecución de los planes de mejoramiento o soporte a los PSA.

En SAAP urbanos de países en desarrollo, la implementación del APPCC fundamentada en los PSA, requiere

de una cultura organizacional con amplio conocimiento del sistema y fuerte compromiso de la alta dirección y todo el personal para garantizar respuestas rápidas, proactivas y responsables frente a los riesgos, la dedicación de un coordinador para gestionar activamente el PSA, el desarrollo de un plan de mejoramiento a largo plazo y la optimización del sistema de monitoreo y control del desempeño de los procesos (Jayaratne, 2008; Omar *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES

El sistema APPCC es una herramienta complementaria de los PSA que sirve de apoyo en la priorización de las fases del tratamiento que requieren ser controladas para asegurar la calidad del agua potable y hacia las cuales se deben orientar los esfuerzos y recursos para la ejecución

de los programas de mejoramiento del PSA. La aplicación del árbol de decisión permitió identificar que varios peligros pueden ser controlados con una misma medida de control y más de una fase del proceso puede estar involucrada en el control de un determinado peligro. Las fases de coagulación, floculación/clarificación, filtración y desinfección fueron los principales PCC identificados en la PTA evaluada. Para que los sistemas de gestión de riesgos, como el APPCC, contribuyan de manera efectiva, continua y rápida al aseguramiento de la calidad del agua y a la protección de la salud pública, es recomendable que en los SAAP exista un trabajo articulado y cooperativo entre los diferentes actores (entidades ambientales, comunidad, empresa, secretarías de salud).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las Empresas Municipales de Cali (EMCALI EICE ESP) por permitir la ejecución del proyecto de investigación y a COLCIENCIAS, la Universidad del Valle y la Universidad Santiago de Cali por la financiación (Proyecto 1106-744-54937).

REFERENCIAS

- APHA, AWWA, WEF (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22^a ed. American Public Health Association, American Water Works Association, World Economic Forum. EEUU. 1200 pp.
- Bartram J, Corrales L, Davison A, Deere D, Drury D, Gordon B, Howard G, Rinehold A, Stevens M (2009) *Water Safety Plan Manual: Step-by-Step Risk Management for Drinking-Water Suppliers*. World Health Organization. Ginebra, Suiza. 108 pp.
- Betancourt W, Rose J (2004) Drinking water treatment processes for removal of *Cryptosporidium* and *Giardia*. *J. Vet. Parasitol.* 126: 219-234.
- Chit-Pin T, See L (2008) Water safety plan for water supply network in Singapore. En *Water Safety Plans: Global Experiences and Future Trends*. ASPBE, IWA, OMS. Lisboa, Portugal.
- Damikouka I, Katsiri A, Tzia C (2007) Application of HACCP principles in drinking water treatment. *Desalination* 210: 138-145.
- Dewettinck T, Van-Houtte E, Geenens D, Van-Hege K, Verstraete W (2001) Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP) to guarantee safe reuse and drinking water production-a case study. *Water Sci. Technol.* 43(12): 31-38.
- Durães M (2007) *Análisis de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC): Estudo de Caso no Sistema de Abastecimento de Água da Universidade Federal de Viçosa*. Tesis. Universidade Federal de Viçosa. Brasil. 117 pp.
- EPA (1984) *Corrosion Manual for Internal Corrosion of Water Distribution Systems*. Environmental Protection Agency. Springfield, VA, EEUU. 141 pp.
- EPA (2006) *Hazard Analysis Critical Point Control (HACCP) Strategies for Distribution System Monitoring, Hazard Assessment and Control*. Environmental Protection Agency. Springfield, VA, EEUU. 28 pp.

- FAO (2002) Sistemas de calidad e inocuidad de los alimentos. En *Manual de Capacitación sobre Higiene de los Alimentos y sobre el Sistema de Análisis de Peligros y de Puntos Críticos de Control (APPCC)*. United Nations Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. 62 pp.
- Gunnarsdottir M, Gissurarson L (2008) HACCP and water safety plans in Icelandic water supply: preliminary evaluation of experience. *J. Water Health* 6: 377-382.
- Gunnarsdottir M, Gardarssona S, Bartram J (2015) Developing a national framework for safe drinking water. Case study from Iceland. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 218: 196-202.
- Havelaar AH (1994) Application of HACCP to drinking water supply. *Food Contr.* 5: 145-152.
- Jayarathne A (2008) Application of risk management system to improve drinking water safety. *J. Water Health* 6: 547-557.
- Monis O, Lau M, Harris M, Cook D, Drikas M (2017) Risk-based management of drinking water safety in Australia: Implementation of health based targets to determine water treatment requirements and identification of pathogen surrogates for validation of conventional filtration. *Food Waterborne Parasitol.* DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fawpar.2017.08.002>.
- Montoya C, Loaiza D, Torres P, Cruz C, Escobar J (2011) Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA* 16: 137-148.
- Moran F, Sullivan C, Keener K, Cullen P (2017) Facilitating smart HACCP strategies with Process Analytical Technology. *Curr. Opin. Food Sci.* 17: 94-99.
- Okeyo A, Momba M, Coetzee M (2011) Application of the HACCP concept for the microbiological monitoring of drinking water quality: A case study of three water treatment plants in the Gauteng Province, South Africa. *Trends Appl. Sci. Res.* 6: 269-281.
- Omar Y, Parker A, Smith J, Pollard S (2017) Risk management for drinking water safety in low and middle income countries. Cultural influences on water safety plan (WSP) implementation in urban water utilities. *Sci. Total Environ.* 576: 895-906.
- Pérez-Vidal A, Torres-Lozada P, Delgado-Cabrera LG (2012) Evolución y perspectivas del sistema de abastecimiento de la ciudad de Santiago de Cali frente al aseguramiento de la calidad del agua potable. *Ing. Compet.* 14: 69-81.
- Pérez-Vidal A, Torres-Lozada P, Escobar-Rivera JC (2016) Hazard identification in watersheds based on Water Safety Plan approach: case study of Cali-Colombia. *EEMJ* 15: 861-872.
- Ropkins K, Beck A (2000) Evaluation of worldwide approaches the use of HACCP to control food safety. *Trends Food Sci Tech* 11: 10-21.
- Torres R (2009) Desarrollando un plan de seguridad del agua. Análisis de peligros y puntos críticos de control. En *Medidas de Control Partes 3 y 4 del Proceso*. Lima, Perú. www.bvsde.paho.org/bvsacg/red_lac_psa/documentostecnicos/3PSAriesgos.pdf
- Upton A, Jefferson B, Moore G, Jarvis P (2017) Rapid gravity filtration operational performance assessment and diagnosis for preventative maintenance from on-line data. *Chem. Eng. J.* 313: 250-260.
- Ursic S, Ursic A (2008) Role of Institute of Public Health in improvement in drinking water safety in Celje region, Slovenia. En *Water Safety Plans: Global Experiences and Future Trends*. ASPEB, IWA, OMS. Lisboa, Portugal.
- Vieira J, Morais C (2005) Planos de segurança em sistemas públicos de abastecimento de água para consumo humano. Série Guias Técnicos 7. Universidade do Minho. Portugal. 178 pp.
- Wallace C, Holyoak L, Powell S, Dykes F (2014) HACCP. The difficulty with Hazard Analysis. *Food Control* 35: 233-240.
- Wang D, Wu H, Hu X, Yang M, Yao P, Ying C, Hao L, Liu L (2010) Application of hazard analysis critical control points (HACCP) system to vacuum-packed sauced pork in Chinese food corporations. *Food Control* 21: 584-591.
- WHO (2008) *Training Workbook on Water Safety Plan for Urban Systems. Western Pacific Region*. World Health Organization. Ginebra. Suiza. 78 pp.
- WHO (2011) *Guidelines for Drinking Water Quality*. 4ª ed. World Health Organization. Ginebra. Suiza. 541 pp.
- Yokoi H, Embutsu I, Yoda M, Waseda K (2006) Study on the introduction of hazard analysis and critical control point (HACCP) concept of the water quality management in water supply systems. *Water Sci Technol* 53: 483-492.

HAZARD ANALYSIS AND CRITICAL CONTROL POINTS IN CONVENTIONAL WATER TREATMENT PLANTS

Andrea Pérez-Vidal, Luis Germán Delgado-Cabrera, Juan Carlos Escobar-Rivera, Camilo Hernán Cruz-Vélez and Patricia Torres-Lozada

SUMMARY

The hazard analysis critical control point system (HACCP) is a widely used tool in the food industry and recommended in the water safety plans (WSP) approach. In this study, a methodological proposal applicable to water treatment processes was adapted integrating the principles of HACCP system and WSP. The study was carried out in a conventional drinking-water treatment plant (DWTP) in the city of Cali, Colombia. It comprised two stages: 1) identification of hazards and hazardous events, and 2) determination of critical control points (CCP) and points of attention (POA). In the first stage the quality of raw, clarified,

filtered and treated water was evaluated in ten water samplings with characterization, during a period of 18 months. In the second stage, a decision tree was adapted and used in the hazardous events categorized as medium or higher risk level. Forty hazardous events, 26 CCP and 10 POA were identified. The main CCP were coagulation, flocculation/clarification, filtration and disinfection phases. The determination of CCP contributed to the prioritization of the treatment phases that required the execution of improvement/support programs defined in the WSP, the priority being catchment and channels/pipelines.

ANÁLISE DE PERIGOS E PONTOS CRÍTICOS DE CONTROLE EM ESTAÇÕES CONVENCIONAIS DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Andrea Pérez-Vidal, Luis Germán Delgado-Cabrera, Juan Carlos Escobar-Rivera, Camilo Hernán Cruz-Vélez e Patricia Torres-Lozada

RESUMO

O sistema de análise de perigos e pontos críticos de controle (APPCC) é uma ferramenta de amplo uso na indústria de alimentos e recomendada no enfoque dos planos de segurança da água (PSA). Nesta investigação adaptou-se uma proposta metodológica aplicável aos processos de tratamento de água que integrou os princípios do sistema APPCC e dos PSA. O estudo realizou-se numa estação de tratamento de água da cidade de Cali, Colômbia, e compreendeu duas etapas: 1) identificação de perigos e eventos perigosos, e 2) determinação de pontos críticos de controle (PCC) e pontos de atenção (POA). Na primeira etapa caracterizou-se a água crua, clarificada, filtrada e trata-

da na PTA a través de dez eventos de amostragem e caracterização, num período de 18 meses. Na segunda etapa adaptou-se uma árvore de decisão que foi aplicada nos eventos perigosos categorizados em nível de risco médio ou superior. Identificaram-se um total de 40 eventos perigosos, 26 PCC e 10 POA, encontrando-se como principais PCC as fases de coagulação, floculação/clarificação, filtração e desinfecção. A determinação dos PCC contribuiu à priorização das fases do tratamento que requerem da execução de planos de melhoramento ou suporte definidos nos PSA, resultando prioritários a captação, os canais e tubulações de condução.