

**IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES INCIDENTES EN EL PRESUPUESTO DE LAS
LABORES DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO EN LA INFRAESTRUCTURA DE
DISTRIBUCIÓN ACUEDUCTO EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE
ABURRÁ**

WILLY GARCÍA HENAO

Ingeniero Sanitario, Especialista en Gerencia de Proyectos

**Trabajo de Grado de Maestría para optar al Título de:
Magíster en Ingeniería, con Énfasis en Gestión de la Construcción**

ASESOR

LUIS FERNANDO BOTERO BOTERO

Arquitecto Constructor, Magíster en Ciencias de la Administración

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

MEDELLÍN

2017

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Medellín, Junio de 2017

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a EPM por apoyar y patrocinar la ejecución de este proyecto y en particular al ingeniero Fernando Cálad Chica jefe de la Unidad Operación y Mantenimiento Provisión Aguas por su apoyo incondicional y motivación para seguir adelante en el proceso formativo.

Al Magister Luis Fernando Botero tutor de este proyecto, por su participación activa, y el aporte de su conocimiento y experiencia.

A David León Vanegas, practicante de Ingeniería Civil del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, por su gran aporte en la investigación de productividad, rendimientos y movilidad.

A mi familia, por la paciencia, comprensión y apoyo brindado en este proceso formativo y a Dios por iluminar mi camino y brindarme las herramientas para seguir creciendo en el ámbito académico, laboral y personal.

Resumen

El presente trabajo contiene los procedimientos y resultados del estudio de caso empresarial, que consistía en identificar y valorar las variables que inciden en el aumento del valor de las ofertas económicas presentadas por las firmas contratistas para atender las necesidades de mantenimiento correctivo del sistema de distribución Acueducto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, con el propósito de que sean tenidas en cuenta e incorporadas en la elaboración de los presupuestos de referencia a cargo de Empresas Públicas de Medellín. A partir de la revisión bibliográfica se identificó que las variables más influyentes en los costos de las actividades a evaluar eran la mano de obra y el transporte del personal, por lo que se decidió valorarlas cuantitativamente por medio de un análisis de productividad y de rendimientos de mano de obra para la primera variable y tiempos y velocidades promedios de desplazamiento para la segunda.

Como resultado de compilar y analizar estadísticamente los datos, se pudo obtener el coeficiente general de productividad del contrato evaluado, generar una base de datos de rendimientos de mano de obra para las actividades más representativas del contrato analizado y la creación de un mapa de líneas isócronas aproximadas para el área de influencia del proyecto. Por último, se identificó las diferencias en los costos directos presentados por los contratistas con respecto a los calculados por EPM, relacionados con la mano de obra y el transporte del personal, materiales y equipos.

Palabras Clave: Mantenimiento correctivo, Sistema de distribución de acueducto; Rendimientos de mano de obra; Productividad, Líneas isócronas.

Abstract

This paper contains the procedures and results of the business case study, which aims to identify and assess the variables that influence the increase of value of the economic offers submitted by the contracting firms to meet the corrective maintenance needs of the water supply system of the Metropolitan Area of the Valley of Aburrá located in Medellín, Colombia, with the purpose of being taken into account and incorporated into the elaboration of the reference budgets of the Colombian utility company Empresas Públicas de Medellín. As a result of the literature review, it was identified that the most influential variables in the costs of the evaluated activities were the human labor and the transport of staff, so it was decided to assess them quantitatively as a productivity and labor yields analysis for the first variable and average travel times and speeds for the second.

As a result of compiling and analyzing the data statistically, the general coefficient of productivity was obtained for the evaluated contract and a database of labor yields was made for the most representative activities of the analyzed contract, and a map of approximate isochronous lines for the area of influence of the project was made. By last, the differences in direct costs presented by contractors were identified as compared to those calculated by EPM related to labor and transportation of staff, materials and equipment.

Keywords: Corrective Maintenance, Water Distribution System; Labor Yields; Productivity, Isochronous Lines.

Tabla de Contenido

	Pág.
DEDICATORIA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
TABLA DE CONTENIDO	6
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE GRÁFICOS	12
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	13
1 GLOSARIO	14
2 INTRODUCCIÓN	17
2.1 IMPORTANCIA DEL RECURSO HÍDRICO PARA LA HUMANIDAD ¡ERROR! MARCADOR	
NO DEFINIDO.	
2.2 PRESTACIÓN DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS EN COLOMBIA..... ¡ERROR!	
MARCADOR NO DEFINIDO.	
2.3 EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P. (EPM)	33
2.4 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (O&M) DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO QUE	
ABASTECE EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ..... ¡ERROR! MARCADOR NO	
DEFINIDO.	
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21

3.1	ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA (IANC).....	21
3.2	PROBLEMÁTICA EN LA PRESENTACIÓN DE PROPUESTAS ECONÓMICAS PARA LOS CONTRATOS DE MANTENIMIENTO.....	24
4	JUSTIFICACIÓN.....	28
4.1	APORTES ESPERADOS DEL DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	28
4.2	PROBLEMÁTICA Y RESULTADOS ESPERADOS EN LA TERCERIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO DE ACUEDUCTO A PARTIR DEL DESARROLLO DE ESTE TRABAJO DE GRADO	29
5	OBJETIVOS.....	31
5.1	OBJETIVO GENERAL.....	31
5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
6	MARCO DE REFERENCIA.....	32
6.1	MARCO TEÓRICO.....	32
6.1.1	<i>Importancia del Recurso Hídrico</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
6.1.2	<i>Sistema de Abastecimiento de Agua Potable (acueducto).....</i>	<i>33</i>
6.1.2.1	Proceso de Captación:	35
6.1.2.2	Proceso de Potabilización:.....	39
6.1.2.3	Sistema de Distribución Primaria:.....	44
6.1.2.4	Sistema de Distribución Secundaria:.....	50
6.1.3	<i>Operación y Mantenimiento de sistemas de distribución de agua</i>	<i>55</i>
6.1.3.1	Operación de sistemas de distribución de agua.....	59
6.1.3.2	Mantenimiento de sistemas de distribución de agua	60
6.1.4	<i>Outsourcing o Tercerización de Actividades.....</i>	<i>70</i>

6.1.4.1	Perspectiva Histórica del Outsourcing	71
6.1.4.2	Tercerización en Ingeniería Colombiana.....	72
6.1.4.3	Tercerización en EPM	73
6.2	ESTADO DEL ARTE.....	32
6.2.1	<i>Contexto Internacional</i>	74
6.2.2	<i>Contexto Regional</i>	77
6.2.3	<i>Contexto Local</i>	78
6.3	AVANCES EN INVESTIGACIÓN	81
6.3.1	<i>Antecedentes del Análisis de Productividad</i>	81
6.3.2	<i>Antecedentes de los rendimientos de mano de obra</i>	83
6.3.3	<i>Antecedentes de Movilidad</i>	86
6.3.3.1	Movilidad de los Contratistas según los Requerimientos del Contrato.....	87
6.3.3.2	Antecedentes e Isócronas	88
7	METODOLOGÍA.....	90
7.1	INTRODUCCIÓN	90
7.2	ETAPAS DE EJECUCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	92
7.2.1	<i>Investigación documental</i>	92
7.2.2	<i>Investigación de campo</i>	95
8	EFICIENCIA Y PRODUCTIVIDAD DE LA MANO DE OBRA EN LAS	
	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE	
	ACUEDUCTO DEL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ	98
8.1	METODOLOGÍA PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO: PRUEBA DE LOS	
	CINCO MINUTOS PARA LA TOMA DE DATOS	98

8.2	CONFIABILIDAD ESTADÍSTICA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	101
8.2.1	<i>Tamaño de la Muestra Requerido para una confiabilidad del 95%</i>	<i>101</i>
8.2.2	<i>Cálculo del Nivel de Confianza para el Número de Datos Obtenidos</i>	<i>103</i>
8.3	RESULTADOS DEL ESTUDIO DE PRODUCTIVIDAD	104
8.4	CAUSAS DE TIEMPO NO-CONTRIBUTIVO.....	106
8.5	INTERPRETACIÓN Y USO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE PRODUCTIVIDAD	107
9	RENDIMIENTOS DE MANO DE OBRA DE MANTENIMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA DE ACUEDUCTO DE EPM.....	110
9.1	METODOLOGÍA DE RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO	110
9.2	ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA CONSOLIDACIÓN DE LA BASE DE DATOS.....	111
10	TIEMPOS PROMEDIO DE DESPLAZAMIENTO A LOS FRENTE DE OBRA	115
10.1	METODOLOGÍA DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	115
10.2	APROXIMACIÓN A ISÓCRONAS USANDO LA VELOCIDAD PROMEDIO DE DESPLAZAMIENTO	117
11	SOBRECOSTOS ASOCIADOS A UNA INEFICIENTE UTILIZACIÓN DEL RECURSO HUMANO EN EL DESARROLLO DE LAS ACTIVIDADES CONTRATADAS TENIENDO EN CUENTA LAS VARIABLES DE PRODUCTIVIDAD Y TIEMPOS DE DESPLAZAMIENTO HALLADOS EN ESTE TRABAJO	123
12	CONCLUSIONES.....	128
13	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

14	APÉNDICE.....	138
14.1	FORMATO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO DE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CONTRATISTAS.....	138
14.2	FORMATO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DEL RENDIMIENTO DE MANO DE OBRA DE LOS CONTRATISTAS.....	141
14.3	FORMATO PARA TIEMPOS DE MOVILIDAD URBANA Y KILOMETRAJE.....	142

Índice de Tablas

	Pág.
<i>Tabla 1 Tipo de Tramos de Red del Sistema de Distribución Primaria</i> _____	46
<i>Tabla 2 Capacidad de Almacenamiento de los Tanques de EPM en el Valle de Aburrá</i> _____	48
<i>Tabla 3 Tipos de Válvula presentes en el Sistema de Distribución Primaria</i> _____	50
<i>Tabla 4 Datos Asociados a la Consulta Bibliográfica</i> _____	94
<i>Tabla 5 Resultados Análisis General de la Productividad para el Contrato de Mantenimiento Acueducto</i> _____	104
<i>Tabla 6 Número de Incidencias por Causas de TNC Ordenadas de Mayor a Menor</i> _____	107
<i>Tabla 7 Intervalos con el 95% de Probabilidad para los Rendimientos de Mano de Obra Obtenidos</i> _____	114
<i>Tabla 8 Distancias Radiales para Isócronas Aproximadas después del Análisis de Regresión Lineal para una Velocidad Promedio de 22.37 [km/h]</i> _____	120
<i>Tabla 9 Análisis componentes costos directos contrato mantenimiento</i> _____	123
<i>Tabla 10 Análisis componentes costos directos presupuesto de referencia EPM</i> _____	124
<i>Tabla 11 Comparativo costos directos contratista y costos directos EPM</i> _____	124

Índice de Gráficos

Pág.

<i>Gráfico 1 Relación de Utilidad vs Índice de Agua No Contabilizada. Fuente. Adaptado Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series, Paper 8, diciembre 2006</i>	23
<i>Gráfico 2 Porcentajes de Desviación en Propuestas de Contratación para el Periodo 2006 – 2014</i>	25
<i>Gráfico 3 Esquema General del Sistema de Acueducto. Fuente. (Autor, 2017)</i>	35
<i>Gráfico 4 Esquema general proceso de potabilización. Fuente. (Autor, 2017)</i>	42
<i>Gráfico 5 Pirámide Esquemática de los tipos de Mantenimiento Adaptado de (Linares, 2012).</i>	62
<i>Gráfico 6 Cobertura Sistemas de Agua Potable en el mundo por regiones. Fuente. Adaptado de (UNICEF y OMS, 2015)</i>	74
<i>Gráfico 7 Modelos de negocios de Asociación Hitachi. Fuente adaptado de (Hasuka, 2015, pág. 586)</i>	76
<i>Gráfico 8 Evolución del número de municipios con principal operador con PSP. Tomado de (Rozo, 2017)</i>	79
<i>Gráfico 9 Resultados obtenidos del Análisis de Productividad General</i>	105
<i>Gráfico 10 Dispersión Distancia Radial VS Distancia Trayectoria</i>	119
<i>Gráfico 11 Correlación Lineal entre la Distancia Radial y la Distancia de Trayectoria</i>	120
<i>Gráfico 12 Isócronas Aproximadas a partir de la Regresión Lineal con Origen en Villahermosa</i>	121

Índice de Ilustraciones

	Pág.
<i>Ilustración 1 Embalse Rio Grande II, Don Matías Antioquia. Fuente. (Autor, 2016)</i> _____	37
<i>Ilustración 2 Torre de captación embalse Rio Grande II. Don Matías Antioquia. Fuente. (Autor, 2016)</i> _____	38
<i>Ilustración 3 Planta de tratamiento de agua potable Manantiales. Medellín Antioquia. Fuente. (Autor, 2016)</i> _____	41

1 Glosario

A continuación, se definen algunos términos que son necesarios entender para una mayor comprensión del documento, las definiciones se han extraído en su gran mayoría del Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS – 2000) y se han adaptado al contexto del presente trabajo académico:

Análisis de Precios Unitarios: es la estructuración del costo componente por componente de una actividad por unidad de medida.

Área de prestación efectiva del servicio: Es la delimitación geográfica en la cual se garantiza por parte de la empresa prestadora del servicio de acueducto, el suministro de agua en cantidad suficiente y con la presión mínima de servicio definida por la norma.

Core business: es la razón de ser de la empresa, donde se obtiene el mayor valor agregado y en lo cual la empresa se especializa.

Cotas de nivel: Es el dato que aparece en los planos, con relación a la altura de un punto en comparación con el nivel del mar o en comparación con otro punto.

Declaratoria desierta: es el mecanismo mediante el cual se comunica a las firmas contratista que hayan presentado oferta económica que dicha necesidad no fue satisfecha por las ofertas presentadas y no se adjudicara a ninguno de los oferentes.

Lean Construction: gestión de proyectos de construcción con la minimización de las pérdidas tanto en tiempo como en materiales.

Mantenimiento correctivo: actividades desarrolladas para reparar las fugas y fallas en la infraestructura de conducción y distribución acueducto.

Mantenimiento preventivo: actividades desarrolladas en la infraestructura de conducción y distribución acueducto, cuyo fin es prevenir que se presenten fugas y fallas en el sistema.

Megóhmetro: equipo que se utiliza para la medida del aislamiento eléctrico en alta tensión.

Oferente: firma contratista que está en capacidad de presentar una propuesta económica para la atención de las actividades de mantenimiento correctivo en la infraestructura de conducción y distribución acueducto.

Perdidas comerciales en el sistema de acueducto: Incluyen las conexiones fraudulentas, los suscriptores que se encuentran por fuera de las bases de datos de facturación de la empresa y dejados de medir por imprecisión o deficiente operación de los micromedidores domiciliarios.

Pérdidas de agua en el sistema de acueducto: Corresponde a la diferencia entre el volumen de agua tratada y medida a la salida de las plantas potabilizadoras y el volumen de agua entregado a la población y que ha sido medido en las acometidas domiciliarias del municipio.

Pérdidas Técnicas en el sistema de acueducto: Incluyen las fugas en tuberías y accesorios y en estructuras, como reboses en tanques de almacenamiento, plantas de tratamiento, etc.

Pliego de condiciones y especificaciones técnicas: es el documento que contiene las condiciones, cláusulas y especificaciones que se aceptan en un contrato de obra o prestación de servicios y que es de carácter obligatorio.

Presupuesto de referencia: es el valor estimado por la empresa contratante de las actividades a contratar.

Procesos de contratación: metodología mediante la cual se convoca, evalúa y selecciona una propuesta económica para atender las actividades de mantenimiento correctivo en la infraestructura de conducción y distribución acueducto.

Propuestas económicas: es el documento presentado por el oferente donde define la forma y los recursos que utilizara para cubrir la necesidad planteada, además del valor de la misma.

Red de distribución primaria: conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde las plantas de tratamiento de agua potable hasta los tanques de almacenamiento, o desde un tanque a otro.

Red de distribución secundaria: conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conduce el agua desde los tanques de almacenamiento hasta los puntos de consumo.

Sistema de alta complejidad: sistema de acueducto que surte del servicio de agua potable a poblaciones mayores a 60 000 habitantes.

Suscriptores: usuarios legalmente conectados a la red de distribución acueducto para abastecer del servicio a un bien inmueble.

Tercerización: modalidad de adquirir algún bien o servicio contratando a empresas expertas en el tema y que represente un ahorro económico, respecto al valor que se tendría al realizar las mismas actividades con personal propio.

2 Introducción

El agua es un recurso natural que se renueva mediante un ciclo continuo de evaporación, precipitación y escurrimiento, conocido como ciclo del agua, el cual determina su distribución y disponibilidad a través del tiempo y el espacio.

“La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km³, de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 millones de km³, es agua dulce. De esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo.” (CONAGUA, 2016)

El Banco Mundial considera el agua como una de las necesidades humanas más básicas, además de indispensable para actividades como: agricultura, generación energética, industria y minería. Debido a sus impactos en la salud, la equidad de género, la educación y los medios de sustento, la gestión de este recurso es esencial para lograr un desarrollo económico sostenible y reducir la pobreza (Banco Mundial, 2017). En este mismo sentido la ONU la define como: “El agua es un componente esencial de las economías nacionales y locales, y es necesaria para crear y mantener los puestos de trabajo en todos los sectores de la economía” (Naciones Unidas, 2016, pág. 15).

La Organización de Naciones Unidas (ONU) declaró en el año 2002 el derecho de todos los seres humanos a disponer de agua suficiente, salubre, aceptable y accesible, para uso personal y doméstico (ONU, 2002). Este derecho universal, le concede un carácter relevante a la gestión de los sistemas de abastecimiento de agua potable, dado que la demanda de este bien aumenta y

su oferta en las fuentes naturales disminuye, lo que exige esfuerzos para mejorar la eficiencia en la gestión del recurso.

Se puede afirmar que en la actualidad se dispone de agua suficiente para satisfacer las necesidades del mundo, pero si no se cambia radicalmente el modo como se usa, se maneja y se comparte, se puede generar una crisis hídrica mundial, que más que un problema de disponibilidad del recurso, es un problema de gobernanza y gestión ineficiente (UNESCO, 2015).

La escasez de agua es uno de los problemas más importantes que se vislumbran a corto plazo en el mundo, se prevé para el año 2030 un déficit del 40% entre la oferta y la demanda de agua, lo que implica este desequilibrio es un agotamiento de los recursos hídricos a un ritmo más alto de lo que el ciclo del agua puede reponer naturalmente. (The Water Resources Group, 2012)

El crecimiento demográfico, la urbanización acelerada, el aumento del nivel de vida y la migración de la población rural a los centros urbanos, están generando un aumento en la demanda de agua potable en zonas puntuales. Se prevé para el año 2050 que la poblacional mundial crecerá un 33%, pasando de 6 970 a 9 310 millones de habitantes, además se estima que la población que vive en las áreas urbanas crecerá un 72%, pasando de 3 630 a 6 250 millones de habitantes (United Nations , 2011).

A nivel mundial el sector publico sigue siendo la fuente principal de financiación de las infraestructuras y servicios de agua potable y cumple las funciones vitales, como la asignación de las concesiones de agua, la fijación y regulación de las tarifas, el mantenimiento de los sistemas, la prestación de servicios, las inversiones en infraestructuras (Naciones Unidas, 2016).

En Colombia según datos de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios) el 78% de los grandes prestadores del servicio de agua potable son de naturaleza oficial y el 22% restante son entidades privadas (Superservicios, 2015).

Bajo este panorama, el presente trabajo se enfoca en identificar y valorar las variables que inciden en los sobrecostos de las propuestas presentadas por las firmas contratistas y cómo estas de ser necesario, son incluidas en la elaboración de los presupuestos de referencia de EPM, para los procesos de contratación de las actividades de mantenimiento correctivo de la infraestructura de Distribución Acueducto que son operadas por EPM en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Para lograr el objetivo del trabajo se elaboró el marco de referencia en el capítulo seis donde se abordaron tres aspectos generales: marco teórico, estado del arte y avances en investigación. En el primer aspecto se describe los conceptos de prestación de servicios públicos domiciliarios, una breve reseña de EPM, la descripción de los sistemas de abastecimiento de agua potable, los conceptos de operación y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento y de Outsourcing o tercerización de actividades. En el segundo aspecto se abordaron los contextos internacional, regional y local y por último en el tercer aspecto se levantaron los antecedentes de análisis de productividad, rendimientos de mano de obra y movilidad.

En el séptimo capítulo se presenta la metodología empleada para el desarrollo del trabajo, se da una contextualización del origen del mismo, los recursos utilizados y la forma como se desarrolló la investigación bibliográfica y el trabajo de campo.

En el capítulo ocho se desarrolla la investigación de eficiencia y productividad de la mano de obra en las actividades de mantenimiento correctivo de redes de acueducto, describiendo la

metodología empleada para la recolección de datos, los fundamentos teóricos para la confiabilidad estadística del estudio, los resultados obtenidos y la interpretación de estos.

En el capítulo nueve se lleva a cabo la investigación de rendimientos de mano de obra, se describe la metodología utilizada para la recolección de datos y el análisis estadístico de la información recolectada que permitió la construcción de una base de datos que se presenta al final del capítulo.

En el capítulo diez se aborda el estudio de movilidad donde se describe la metodología utilizada para la recolección de datos en campo y la para la definición de las isolíneas que se graficaron al final del capítulo.

En el capítulo once se cuantifican los sobrecostos asociados a la baja productividad y a la movilidad, los cuales se presentan en porcentajes, debido a la confidencialidad de la información que exige EPM y en general las empresas el estado, en temas relacionados con los presupuestos de procesos de contratación por licitación pública.

Por ultimo en el capítulo doce, se realizan las consideraciones finales del trabajo, donde se brindan las conclusiones generales y se dan recomendaciones basadas en los resultados obtenidos.

3 Planteamiento del Problema

El Banco Mundial estima que cada año se pierden más de 32 mil millones de metros cúbicos de agua en los sistemas de abastecimiento urbanos a causa de fugas en la infraestructura. Los cálculos indican que alrededor del 35% de la extracción de agua mundial se pierden por este concepto (Kingdom, Liemberger, & Marin, 2006).

3.1 Índice de Agua No Contabilizada (IANC)

Las pérdidas en los sistemas de abastecimiento de agua potable, que son inherentes a la operación del sistema, son denominadas como el Índice de Agua No Contabilizada (IANC), que se calcula como la diferencia entre el volumen de agua tratada y medida a la salida de las plantas potabilizadoras y el volumen de agua entregado a la población y que ha sido medido en las acometidas domiciliarias (RAS, 2010). Las pérdidas se clasifican de dos maneras, comerciales cuando están asociadas a conexiones fraudulentas, suscriptores que se encuentran por fuera de las bases de datos de facturación de la empresa y los volúmenes dejados de medir por imprecisión o deficiente operación de los micromedidores domiciliarios (RAS, 2010) y técnicas, cuando están relacionadas con las fugas en tuberías y accesorios y en estructuras, como reboses en tanques de almacenamiento, plantas de tratamiento, etc. (RAS, 2010).

El marco regulatorio colombiano, establece que en la fórmula tarifaria del servicio de acueducto y saneamiento básico, deben incluirse aspectos relacionados con los costos de expansión, reposición, administración, operación y mantenimiento de las redes e infraestructura de acueducto y saneamiento básico, además estipula que el IANC que se aceptará para el cálculo de los costos de prestación del servicio de acueducto será del 30% (Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2014) en el sentido que establece la Ley 142 de 1994,

según la cual las empresas prestadoras de servicios públicos no pueden transferir en las tarifas que cobran a los usuarios los sobrecostos de una gestión ineficiente.

El sistema de acueducto que surte del servicio de agua potable a los municipios pertenecientes al Área Metropolitana del Valle de Aburrá y que es operado por EPM, presentó en el año 2014 un IANC del 33,1%, (Superservicios, 2015), evidenciando una ineficiencia en la gestión de la infraestructura de abastecimiento de agua potable y que según afirma la ONU puede acarrear perjuicios a las economías y a la sociedad, con el riesgo de revertir los logros alcanzados a nivel mundial en la reducción de la pobreza, la creación de empleo y el desarrollo (Naciones Unidas, 2016).

El alto porcentaje del IANC en los sistemas de abastecimiento en los centros urbanos, van asociados a los niveles de utilidad económica esperados por las empresas prestadoras del servicio. En el Gráfico 1, se aprecia que la mayor utilidad se alcanza con niveles de pérdidas entre 30 y 40% del volumen de agua entregado y facturado, mientras que los niveles de utilidad más bajos, se presentan con el porcentaje de pérdida inferiores al 10% (Kingdom, Liemberger, & Marin, 2006), lo anterior se explica, dado que a medida que se reduce los porcentajes de pérdida en un sistema de abastecimiento, se debe realizar una mayor inversión para seguir reduciendo

este porcentaje, es decir se deben invertir muchos más recursos para obtener mejores resultados.

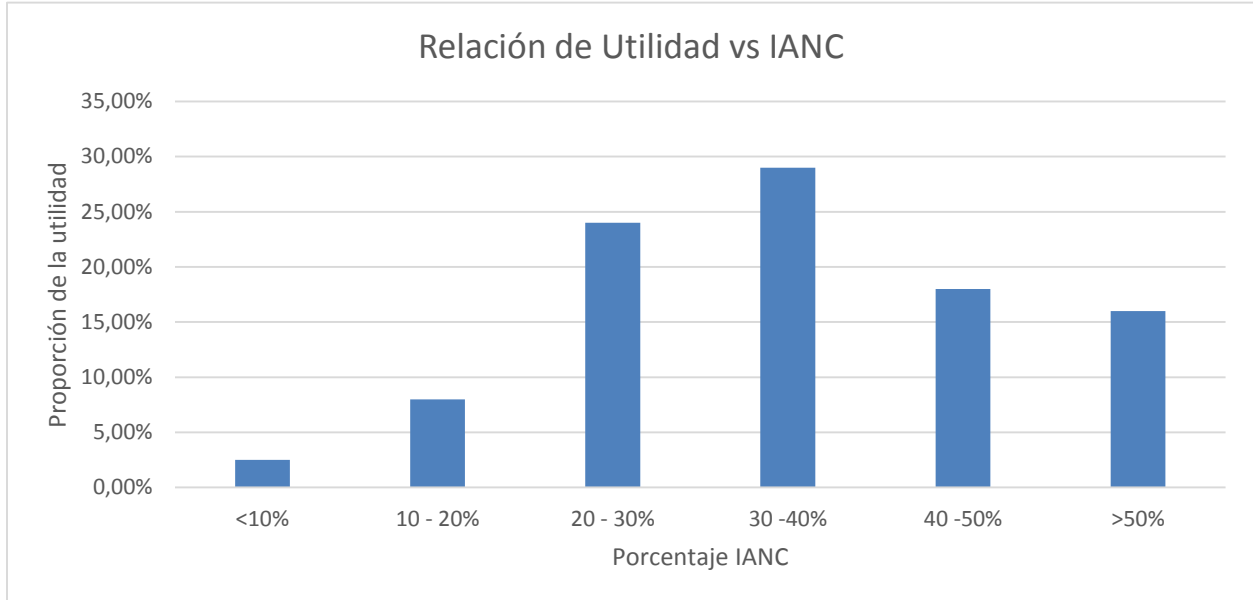


Gráfico 1 Relación de Utilidad vs Índice de Agua No Contabilizada. Fuente. Adaptado Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series, Paper 8, diciembre 2006

Esta problemática genera el desafío de lograr una gestión eficiente y sostenible en el mantenimiento de la infraestructura de acueducto que actualmente opera EPM en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y de esta forma garantizar un suministro seguro, fiable y asequible del recurso, mejorar el nivel de vida, expandir la economía local y promover la creación de puestos de trabajo más dignos y una mayor inclusión social (Naciones Unidas, 2016).

Para lograr los resultados esperados en la administración del recurso hídrico se hace necesario que los contratos de mantenimiento del sistema de distribución de acueducto estén presupuestados de una manera justa, en donde tanto el usuario del servicio, como EPM y las empresas contratistas puedan obtener beneficios económicos de ahorro y de utilidad a la vez que se garantiza la calidad del servicio. Por lo anterior se hace necesaria una correcta evaluación de propuestas con base en un presupuesto de referencia que se ajuste lo mayormente posible a los

costos asociados al mantenimiento correctivo de la infraestructura de distribución de acueducto bajo las variables inherentes a las condiciones locales del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

3.2 Problemática en la presentación de propuestas económicas para los contratos de mantenimiento

Durante los últimos tres años se ha presentado una problemática con los procesos de contratación para el mantenimiento de las redes de distribución de acueducto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, dado que los oferentes han entregado propuestas económicas por valores superiores al 30% del presupuesto de referencia, lo que ha obligado en determinados casos a la adjudicación de contratos por encima del presupuesto de referencia, y en otros, a la declaratoria de desierta de los procesos de contratación, poniendo el sistema en alto grado de vulnerabilidad, por no contar con los recursos suficientes para atender las necesidades de mantenimiento, generado un aumento en los tiempos de atención de daños y sobrecostos asociados a la pérdida de oportunidad y a la implementación de planes de contingencia.

En la siguiente grafica se presenta un análisis del comportamiento histórico de la desviación de los precios propuestos por los contratistas en comparación con el presupuesto de referencia estimado por EPM para los contratos de mantenimiento de acueducto entre los años 2006 y 2014.

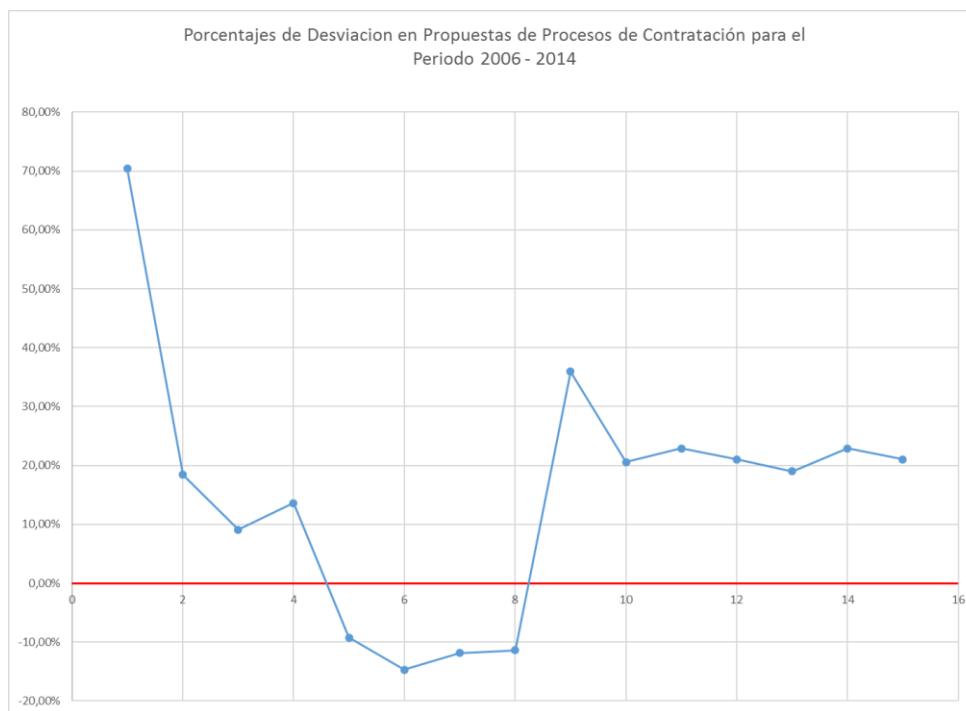


Gráfico 2 Porcentajes de Desviación en Propuestas de Contratación para el Periodo 2006 – 2014

En la gráfica se observa un comportamiento de valores de propuestas más alto que el oficial de EPM entre los años 2006 a 2009; a partir de allí, cambia la tendencia a valores por debajo del presupuesto oficial y, nuevamente en 2012, vuelve a presentarse la tendencia alcista.

Al presentarse valores altos en el año 2006 y después de declarado desierto el proceso de contratación de ese año, se recurre a la ejecución de las mismas actividades de mantenimiento a través de Juntas de Acción Comunal con el fin de ajustar los precios a valores más normales del mercado. Sin embargo, esta estrategia fue temporal, pues la asignación de recursos de EPM a la administración de este tipo de contratos era mayor, se perdía capacidad operativa y se disminuían las tareas de mantenimiento preventivo, generando aumento del mantenimiento correctivo.

Posteriormente en el año 2007 se implanta otra estrategia, basada en la publicación de precios tope para los ítems de los formularios de cotización para los proponentes, logrando de

este modo mantener el mercado dentro de unos límites ajustados a los valores estimados por EPM. Sin embargo, esto fue cuestionado por la Junta Directiva de EPM, volviendo en el año 2011 a las mismas condiciones de contratación que se tenían antes y que se mantienen actualmente en los procesos de contratación.

En el año 2012, para procesos de contratación con plazos de ejecución a 36 meses, se vuelven a recibir ofertas con valores muy superiores a los estimados por EPM, lo cual fue considerado no conveniente desde el punto de vista económico para EPM, declarando desiertos los procesos de contratación.

Ante la situación descrita en el párrafo anterior, se trató de llegar a acuerdos de modificación con los representantes de los contratos vigentes, pero no fue posible lograrlo con ninguno de ellos, lo cual motivó el inicio de un periodo de contingencia operativa, dada la no disponibilidad de contratos y la incertidumbre encontrada por las diferencias entre los precios del mercado y los de EPM.

A raíz de eso, se determinó realizar un proceso de contratación por un periodo de 6 meses para las tres zonas de mantenimiento, y poder así atender la contingencia operativa, iniciando con las zonas centro y norte. Mientras se preparaban los pliegos y se hacía un análisis de las condiciones del mercado para ajustar los valores de EPM a las nuevas realidades que se presentaban, se solicitó apoyo del Área Proyectos Redes Aguas, para realizar parte del mantenimiento correctivo de la red en las zonas centro y norte hasta el mes de marzo de 2013, cuando se estimaba iniciar la ejecución de los nuevos contratos de mantenimiento por un periodo mayor. La zona sur terminaba su contrato el 22 de febrero de 2013, para este sector se logró una ampliación por 6 meses más, hasta agosto de 2013.

Al solicitar las propuestas en el proceso de contratación de mantenimiento para los sectores norte y centro, se obtienen desviaciones que varían en un rango entre +25.41% y un +38.05%. Por tal motivo fue solicitado ajuste económico, para el cual, sólo presentaron nueva oferta dos firmas contratistas. Se obtiene con este ajuste un nuevo rango de desviación entre el +22.89% y el +38.05%.

Sin embargo, a pesar de estar por encima del presupuesto oficial de EPM, se recomendó su adjudicación, pues las condiciones del sistema atendido con el plan de contingencia implementado, dejaron un vacío operativo, debido a que no se venía ejecutando el mantenimiento preventivo ya que el recurso propio se encontraba apoyando la ejecución del mantenimiento correctivo, no se ejecutan proyectos de reposición y extensión de redes, lo que iba en detrimento del normal funcionamiento del sistema.

Bajo este panorama, el presente trabajo se enfoca en investigar, identificar y evaluar las variables que inciden en el precio final de las labores de mantenimiento correctivo de la infraestructura de distribución acueducto que son operadas por EPM en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y cómo, cuando se identifique la necesidad, estas variables deban ser consideradas en la elaboración de los Presupuesto de Referencia.

4 Justificación

La identificación, evaluación y valoración de las variables que tienen incidencia en el costo de las actividades de mantenimiento correctivo de la infraestructura de distribución acueducto, permitirá contar con las herramientas necesarias para valorar y contratar la ejecución de las obras, a precios justos, garantizando beneficios a nivel operacional y económico tanto a la empresa contratante EPM, como a sus empresas contratistas.

4.1 Aportes esperados del desarrollo del trabajo de grado

Los beneficios que se pretenden obtener del presente estudio, son múltiples y para diferentes grupos de interés. En primer lugar, se beneficiará EPM al contar con las herramientas necesarias para cuantificar el valor de las actividades y poder evaluar con criterios actualizados las ofertas presentadas por las firmas contratistas para la ejecución de los trabajos y de esta manera capturar beneficios económicos a mediano y largo plazo, además de capturar otros beneficios como la continuidad y calidad en el servicio de acueducto, eficiencia en sus procesos de mantenimiento, imagen positiva ante la comunidad.

Los segundos beneficiados serán los usuarios del servicio de acueducto que abastece al Valle de Aburrá, dado que, al contar con unos precios competitivos y lograr una reducción en el IANC, se podrá obtener reducciones en la tarifa del servicio de agua potable, además de la reducción de los precios de los trabajos ejecutados en las domiciliarias de acueducto, los cuales tienen cobro directo al usuario, según lo dispuesto en la Ley 142 de 1994. Además, se garantizaría una mayor continuidad del servicio lo que mejoraría la calidad de vida de todos los habitantes.

Por último, las empresas contratistas se verán beneficiadas dado que el objetivo del trabajo es lograr la contratación de las actividades a precios justos, donde la empresa que sea la adjudicataria del algún proceso de contratación obtenga un pago justo por las labores desempeñadas y con ello obtener una utilidad que le permita crecer como empresa y consolidarse como aliado estratégico del Grupo EPM.

4.2 Problemática y resultados esperados en la tercerización del mantenimiento de acueducto a partir del desarrollo de este trabajo de grado

En la actualidad es muy común la tercerización de las actividades de soporte que no hacen parte del *core business* de las empresas, en busca de una mayor eficiencia en los procesos, capturar beneficios económicos, reducir la carga administrativa y permitir enfocar los recursos de la organización a su actividad principal.

Como estrategia para el mantenimiento correctivo de la infraestructura de distribución acueducto EPM, adoptó la tercerización mediante procesos de contratación por modalidad de solicitud de ofertas por licitación pública, con el propósito de incorporar firmas contratistas expertas en este tipo de actividades a la dinámica de la empresa y reducir la carga administrativa con los correspondientes ahorros económicos y dejando en manos de firmas especializadas y con vasta experiencia certificada en el mercado, la ejecución de actividades de mantenimiento de la infraestructura.

Inicialmente la estrategia arrojó resultados satisfactorios y se pudo contratar sin mayores inconvenientes las actividades para la ejecución del mantenimiento de las actividades. Pero en los últimos 3 años se presentó la problemática que se mencionó en el planteamiento del problema de este trabajo, por lo que surgió la necesidad de investigar, identificar y evaluar las variables

que inciden en el precio final de las propuestas presentadas por las firmas contratistas y como éstas son consideradas o incorporadas en la elaboración de los presupuestos de referencia de EPM.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende minimizar la brecha entre el valor de las ofertas económicas presentadas por las firmas contratistas y el presupuesto de referencia elaborado por EPM para los procesos de contratación para el mantenimiento correctivo de la infraestructura de distribución acueducto.

5 Objetivos

5.1 Objetivo General

Identificar y valorar las variables que inciden en el aumento del valor de las ofertas económicas presentadas por las firmas contratistas para atender las necesidades de mantenimiento correctivo del sistema de distribución de Acueducto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, con el propósito de que sean tenidas en cuenta e incorporadas en la elaboración de los presupuestos de referencia.

5.2 Objetivos Específicos

- Realizar el estudio de la eficiencia y la productividad de la mano de obra en actividades de mantenimiento correctivo en las redes de distribución de agua potable en el Valle de Aburrá.
- Determinar las tasas de producción de algunas actividades de mantenimiento mediante la medición en campo y en tiempo real de los trabajos que en la actualidad son desarrolladas por los contratistas.
- Evaluar y calcular los tiempos promedio de desplazamiento de las cuadrillas a los frentes de obra y crear un mapa de líneas isócronas para el área metropolitana del Valle de Aburrá.
- Medir y cuantificar los sobrecostos asociados a una ineficiente utilización del recurso humano, en el desarrollo de las actividades contratadas teniendo en cuenta las variables de productividad y tiempos de desplazamiento.

6 Marco de Referencia

6.1 Marco teórico

6.1.1 Prestación de Servicios Públicos Domiciliarios en Colombia

Los recursos para el sector de agua potable y saneamiento básico en Colombia provienen de tres fuentes, en primer lugar las Transferencias del Sistema General de Participaciones (SGP), recursos destinados a subsidios, planes de obras e inversiones y procesos de modernización empresarial; en segundo lugar el Presupuesto General de la Nación (PGN), recursos destinados a planes de obras e inversiones y modernización empresarial, y por último los Recaudos vía Tarifa, recursos destinados a financiar los planes de obras en inversiones, los costos de prestación del servicio incluyendo administrativos, comerciales y operativos.

La transformación del sector de servicios públicos domiciliarios en Colombia se da en dos grandes hitos: la reforma constitucional de 1986, que consagró la elección popular de alcaldes, y la reforma del régimen de los servicios públicos domiciliarios adoptada mediante la Ley 142 de 1994, que desmonopolizó la prestación de los servicios y la abrió a la participación del sector privado (Banco Interamericano de Desarrollo, 2013).

A finales de los años 80, en Colombia, los servicios públicos domiciliarios, entre ellos el de acueducto, eran provistos, bajo un régimen de monopolios territoriales, por un conjunto de empresas estatales de orden nacional, departamental y municipal. En general, el sector de los servicios públicos presentaba problemas de insuficiencia financiera, ineficiencia administrativa y operacional e injerencia política en la gestión de las empresas, todo lo cual se traducía en coberturas insuficientes y mediocre calidad de los servicios provistos, no obstante, existían

empresas que escapaban a esa realidad, como las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM). (Banco Interamericano de Desarrollo, 2013).

6.1.2 Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM)

EPM es una empresa de Servicios Públicos Domiciliarios, propiedad del Municipio de Medellín. Su historia comenzó “El 18 de noviembre de 1955 cuando la Alcaldía de Medellín reglamentó su existencia con la expedición de los Estatutos (Decreto 375), y el 25 de noviembre de ese mismo año la sancionó el Gobernador. Pero fue sólo en enero de 1956 cuando realmente EPM inició su vida administrativa”. (EPM, 2016).

Actualmente, la Gerencia Provisión Aguas de EPM tiene dentro de su Estructura Administrativa la Unidad Operación y Mantenimiento Provisión Aguas quien se encarga, como su nombre lo indica, de operar y realizar el mantenimiento Preventivo, Correctivo y de Emergencia del Sistema de Acueducto que abastece el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

6.1.3 Sistema de Abastecimiento de Agua Potable (acueducto)

El primer acueducto del que se tiene registro en el mundo fue construido en el año 700 A.C. en Nínive capital de Asiria. Pero fue el imperio Romano a partir del año 312 A.C. que desarrollo la técnica de construcción de acueductos subterráneos y superficiales, este desarrollo llevo al imperio Romano en el año 70 A.C a designar un superintendente de aguas quien fue Sextos Julios Frontinus (Mora, 2014).

En Colombia, el primer acueducto del que se tiene registro, fue construido en la ciudad de Bogotá en el año de 1584. Consistía en un canal abierto que conducía agua desde el rio San Agustín hasta la plaza principal; los materiales de construcción del canal fueron cal, ladrillo y piedra. Este acueducto fue conocido como Los Laureles.

Se puede concluir que los acueductos surgieron de la necesidad de abastecer de agua a los centros poblados tal como lo citan en su artículo Gutiérrez, Lizcano y Chacón:

“El desarrollo de los primeros centros poblados condujo a la construcción de los acueductos, que mediante canales abiertos conducían por gravedad el agua hasta las plazas centrales, donde la gente la tomaba en pilas públicas” (Gutierrez, Lizcano, & Chacón, 2012).

Una vez se inicia el desarrollo en la construcción de canales de conducción de agua surge la necesidad de diseñar, construir y operar lo que se conoce como un sistema de abastecimiento de agua potable el cual debe garantizar el suministro de agua apta para el consumo humano, para uso doméstico, comercial, industrial y recreacional de una determinada población, de manera continua, con la cantidad y calidad requerida.

En este orden de ideas, un sistema de agua potable se define como el conjunto de instalaciones y equipos utilizados para abastecer de agua a una población de forma continua en cantidad suficiente y con la calidad y la presión necesarias para garantizar un servicio adecuado a los usuarios. (CARE Internacional-Avina., 2012).

En aras de ser más eficientes y utilizar la menor cantidad posible de energía, en los lugares donde las diferencias de alturas lo permiten, los sistemas de abastecimiento trabajan por gravedad, este caso se presenta en ciudades o regiones con topografía escarpada como es el caso del sistema objeto de este estudio. En ciudades o regiones con topografías planas los sistemas de bombeo juegan un papel fundamental en la operación del sistema de acueducto, ya que son necesarios para inyectar velocidad y presión del fluido en las redes.

No obstante, y pese a las diferencias de cotas de nivel que encontramos en el sistema de acueducto que surte al Área Metropolitana del Valle de Aburrá de agua potable, existen sistemas de bombeo entre algunos tanques, para garantizar el suministro de agua en los barrios de las laderas que se encuentran en las cotas más altas del área de prestación efectiva del servicio.

Un sistema de acueducto, está conformado por 4 procesos los cuales se deben dar de manera consecutiva:

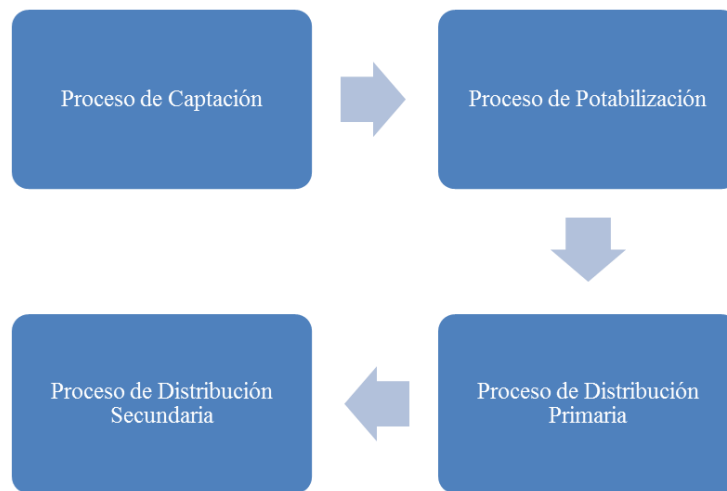


Gráfico 3 Esquema General del Sistema de Acueducto. Fuente. (Autor, 2017)

6.1.3.1 Proceso de Captación:

Es el proceso mediante el cual se toma agua cruda de la fuente de abastecimiento y se lleva a la planta de tratamiento de agua potable. Está conformada por la estructura que toma el agua de la fuente (Bocatoma) y la tubería o canal que conduce el agua sin tratar desde la bocatoma hasta la planta de tratamiento de agua potable (Aducción) (RAS, 2010).

6.1.3.1.1 Fuente de abastecimiento

Las fuentes de abastecimiento se pueden clasificar como convencionales y no convencionales. En el primer grupo se incluyen ríos, quebradas, lagos, embalses, pozos y campos de infiltración, en el segundo grupo se incluyen el agua de mar y las aguas residuales reutilizables, estas últimas suelen generar altos costos en su tratamiento y potabilización.

Las fuentes de abastecimiento del sistema de acueducto operado por EPM son convencionales; a continuación, se mencionan las más representativas:

- Embalse la Fe: localizado en el este de Medellín, 5 kilómetros fuera del municipio del Retiro, su capacidad útil es de 11,58 millones de m³, el cual es alimentado principalmente por las quebradas Las Palmas, Espíritu Santo, Potreros y La Miel. Las otras fuentes del subsistema son los ríos Pantanillo y Piedras, que son trasvasados al embalse mediante dos bombes en serie que permiten desviar aproximadamente 6,1 m³/s.
- Embalse Rio Grande II: localizado en el noroeste de Medellín, cerca del municipio de Don Matías y el cual es alimentado principalmente por los ríos Grande y Chico, su capacidad útil es de 152,1 millones de m³.
- Embalse Piedras Blancas: localizado al nororiente del municipio de Medellín a 6 kilómetros del municipio de Guarne y posee una capacidad total de almacenamiento de 550 mil de m³, el cual es alimentado por las quebradas Piedras Blancas y Chorrillos. La otra fuente de abastecimiento es la quebrada La Honda, que es transvasada al embalse a través de un sistema de bombeo.
- Las otras fuentes de abastecimiento son las quebradas La Valeria y La Reventona en el municipio de Caldas, La Manguala, Las Despensas, La Larga y Doña María

en el corregimiento de San Antonio de Prado, La Iguaná, La Puerta y La Tenche en el corregimiento de San Cristóbal, La López y El Viento en el municipio de Barbosa, La Picacha en el corregimiento de Belen Aguas Frías, Chachafruto y Los Azules en el corregimiento de Palmitas y Santa Elena en el oriente de Medellín.



Ilustración 1 Embalse Rio Grande II, Don Matías Antioquia. Fuente. (Autor, 2016)

6.1.3.1.2 Bocatoma:

Es la estructura que toma el agua directamente de la fuente, y puede ser de diversos tipos, dependiendo del tipo de fuente a utilizar y las propiedades de caudal requerido, entre las más comunes están:

- **Torres de Captación:** es la estructura que se construye en inmediaciones de un embalse y consiste en una torre en concreto, generalmente de sección circular en las cuales se alojan las compuertas metálicas para el control del flujo del agua. Este tipo de estructuras se utiliza generalmente en los embalses de generación energía y su uso se puede denominar de multipropósito puesto que una vez el fluido cumplió su función de generación de energía, se conduce por tuberías (aducción) a las plantas de potabilización. En el sistema de acueducto de EPM, este tipo de captación es el que se utiliza en los embalses mencionados en el numeral anterior.

- **Captación de toma en dique:** es la estructura que se construye en sentido transversal al sentido de flujo del afluente, consiste en un dique de represamiento donde el área de captación se ubica sobre la cresta del vertedero central y está protegida mediante rejas que permiten el paso del agua (Organización Panamericana de la Salud, 2004). En el sistema de acueducto de EPM, este tipo de captación es el que usualmente encontramos en las 18 fuentes mencionadas en el numeral 6.1.2.1.1 Fuentes de Abastecimiento.
- **Captación de toma lateral:** es la estructura que se construye en uno de los costados del curso del afluente, permitiendo que el agua ingresa directamente a una caja de captación para su posterior conducción a través de tuberías o canal. Este tipo de bocatomas se usa en ríos de caudal bajo. El sistema de EPM no cuenta con este tipo de estructuras de captación. (Organización Panamericana de la Salud, 2004)



Ilustración 2 Torre de captación embalse Rio Grande II. Don Matías Antioquia. Fuente. (Autor, 2016)

6.1.3.2 Proceso de Potabilización:

Es el proceso mediante el cual se transforma el agua cruda captada de la fuente, en agua - potable, utilizando procesos físico-químicos que permiten la obtención de agua con propiedades organolépticas, física, biológicas y químicas aptas para el consumo humano.

El proceso de potabilización se lleva a cabo en una estructura conocida como Planta de Tratamiento de Agua Potable, la cual integra los componentes necesarios para realizar el tratamiento del agua cruda, tales como floculación, sedimentación, filtración y desinfección, lo que permite la eliminación de las impurezas y microorganismos que representan riesgos a la salud humana.

El sistema de acueducto operado por EPM en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá está conformado por 11 plantas de potabilización, con una capacidad total nominal de 17.25 m³/s, las cuales se enumeran a continuación en orden de importancia:

1. **Planta de tratamiento de agua potable Manantiales:** localizada al nordeste del municipio de Medellín, entró en operación en 1992, actualmente tiene una capacidad de 6 m³/s. La planta recibe sus aguas del embalse Río Grande II, el cual entró en operación con propósito múltiple generar electricidad y proveer agua.
2. **Planta de tratamiento de agua potable La Ayurá:** localizada en el municipio de Envigado, entró en operación en 1968, actualmente tiene una capacidad de 9,2 m³/s. La planta recibe sus aguas del embalse La Fe, el cual entró en operación con el propósito múltiple generar electricidad y proveer agua.
3. **Planta de tratamiento de agua potable Villa Hermosa:** localizada en el centro oriente de la ciudad de Medellín, entro en operación en 1943, actualmente tiene una

capacidad de 0,95 m³/s. La planta recibe sus aguas del embalse Piedras Blancas.

4. **Planta de tratamiento de agua potable La Montaña:** localizada al nororiente de la ciudad de Medellín, entro en operación 1995, actualmente tiene una capacidad de 0,38 m³/s. La planta recibe sus aguas del embalse Piedras Blancas.
5. **Planta de tratamiento de agua potable La Cascada:** localizada en el centro oriente de la ciudad de Medellín, entro en operación en 1996, actualmente tiene una capacidad de 0,1 m³/s. La planta recibe sus aguas de la quebrada Santa Elena.
6. **Planta de tratamiento de agua potable San Cristóbal:** localizada en el centro occidente de la ciudad de Medellín, entro en operación en 1964, actualmente tiene una capacidad de 0,23 m³/s. La planta recibe sus aguas de las quebradas La Iguaná, La Puerta y Tenche.
7. **Planta de tratamiento de agua potable San Antonio de Prado:** localizada en el sur occidente del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, entro en operación en 1987, actualmente tiene una capacidad de 0,1 m³/s. La planta recibe sus aguas de las quebradas La Manguala, Las Despensas, La Larga, Afluentes y La Chata.
8. **Planta de tratamiento de agua potable Aguas Frías:** localizada en el centro occidente del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, entro en operación en 1996, actualmente tiene una capacidad de 0,03 m³/s. La planta recibe sus aguas de la quebrada La Picacha.
9. **Planta de tratamiento de agua potable Caldas:** localizada en el sur del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, entro en operación en 1997, actualmente tiene una capacidad de 0,2 m³/s. La planta recibe sus aguas de las quebradas La Valeria y La Reventona.

10. **Planta de tratamiento de agua potable Barbosa:** localizada en el norte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, entro en operación en 1997, actualmente tiene una capacidad de 0,08 m³/s. La planta recibe sus aguas de las quebradas El Viento y La López.

11. **Planta de tratamiento de agua potable Palmitas:** localizada en el occidente del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, entro en operación en 1998, actualmente tiene una capacidad de 0,003 m³/s. La planta recibe sus aguas de las quebradas Los Azules y Chachafruto.



Ilustración 3 Planta de tratamiento de agua potable Manantiales. Medellín Antioquia. Fuente. (Autor, 2016)

El proceso de potabilización está dividido en 4 subprocesos, que van encadenados uno de otro:

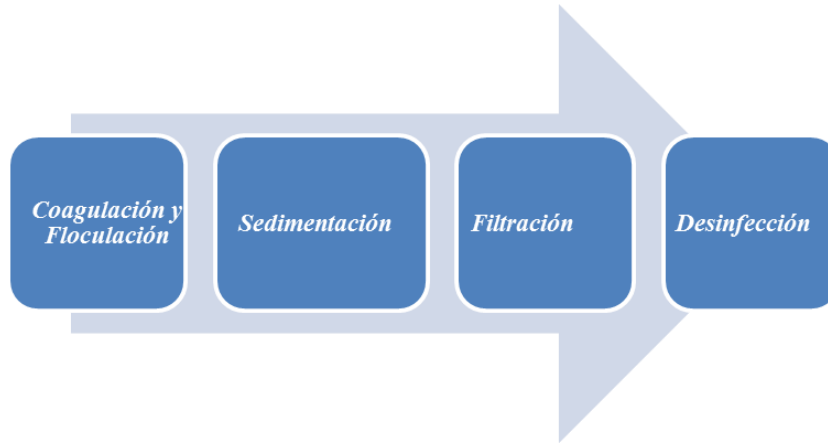


Gráfico 4 Esquema general proceso de potabilización. Fuente. (Autor, 2017)

6.1.3.2.1 Coagulación y Floculación

Es el proceso mediante el cual se adicionan sustancias químicas al agua, para la posterior eliminación de las sustancias que vienen en forma coloidal, este proceso se da en dos etapas:

1. Coagulación:

En esta parte del proceso se adiciona al agua una sustancia química, generalmente sales de hierro o aluminio, de las cuales la más utilizadas son sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, polímeros de aluminio, cloruro férrico y sulfato férrico, estas sustancias generan una desestabilización de la carga exterior de las partículas coloidales, evitando la repulsión entre ellas, y favoreciendo la formación de coágulos de mayor tamaño que se sedimentan por su mayor peso y densidad.

(GRUPO TAR ESCUELA UNIVERSITARIA POLITECNICA DE SEVILLA, 2017).

Una buena coagulación depende de la calidad de agua a tratar, la velocidad de la mezcla, la agitación y el tipo de coagulante utilizado.

2. Floculación:

En esta parte del proceso el agua con el coagulante disuelto, ingresa a una cámara de flujo lento y baja agitación que favorece el agrupamiento de las partículas coloidales desestabilizadas, generando flóculos de mayor tamaño lo que favorece su decantación en el proceso que le precede.

6.1.3.2.2 Sedimentación

Es el proceso mediante el cual se separan las partículas sólidas dispersas del agua y su separación se presenta una vez el agua floculada ingresa por la parte inferior de una cámara de flujo ascendente conocida como sedimentador, que está dotada de pantallas inclinadas generalmente 45° para impedir que los flóculos formados en el proceso anterior emerjan a la superficie de la unidad. En esta parte del tratamiento se favorece la precipitación de las partículas por acción de la gravedad. El agua clarificada emerge en la parte superior donde es recolectada en canaletas que se encuentran instaladas en la superficie de la lámina de agua de la unidad de sedimentación.

6.1.3.2.3 Filtración

Es el proceso mediante el cual se eliminan los sólidos suspendidos que contienen protozoos, bacterias y virus, mediante el paso del agua clarificada en el proceso de sedimentación, por lechos de materiales granulares (arena, antracita, entre otros) que retiran y retiene los contaminantes.

6.1.3.2.4 Desinfección

Es el proceso mediante el cual se adicionan productos químicos o gases para matar los microorganismos (protozoos, bacteria y virus) que no fueron retenidos en el proceso de filtración y que pueden poner en riesgo la salud humana.

La desinfección se da principalmente agregando cloro o inyectando ozono al agua filtrada, para el caso de EPM se utiliza la adición de cloro el cual se agrega con una concentración que garantice un cloro residual para el tiempo que dura el agua en las redes de distribución primaria y secundaria, lo que permite entregar un agua 100% potable en las domiciliarias de acueducto.

6.1.3.3 Sistema de Distribución Primaria:

Es el conjunto de tuberías, tanques, válvulas y estructuras que transportan el agua desde la salida de las plantas de tratamiento hasta los tanques de almacenamiento o desde un tanque a otro.

6.1.3.3.1 Redes de distribución primaria

Son las redes que transportan el agua potable, desde la salida de las plantas de tratamiento hacia los tanques de almacenamiento y entre ellos.

Generalmente se instalan subterráneamente y se utilizan materiales que presenten altas resistencias a las presiones hidrodinámicas.

Las redes de distribución primaria se diferencian de las redes de distribución secundaria porque son líneas expresas, de las cuales no se deben realizar derivaciones para domiciliarias de acueducto.

EPM en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, tiene una extensión de 307 km de redes de distribución primaria, los principales materiales de las tuberías instaladas son:

- Concrete Cylinder Pipe (CCP) 53,65%
- Hierro Dúctil (HD) 22,03%
- Acero 14,39%
- Otros materiales 9,93%

Se aprecia que los materiales predominantes en las redes de distribución primaria son los metálicos, lo anterior por los requerimientos de resistencia a las altas presiones que tiene el sistema, donde se alcanzan presiones cercanas a las 600 psi.

En lo referente a los diámetros se tiene una amplia gama de valores, el diámetro más pequeño es de 10 pulgadas y la red de mayor diámetro es de 48 pulgadas.

Los tramos de redes de distribución primaria se conocen normalmente como “**conducciones**” y suelen nombrarse acorde a puntos de referencia como planta, tanques o lugar donde se bifurcan, una “conducción” (tramo de red de distribución primaria) está configurada con una válvula de arranque una válvula de salida, un descargue y de esta se pueden derivar redes que son denominados como “**ramales**” y las cuales llevan el agua a tanques de almacenamiento.

A modo de ejemplo y para el sistema objeto de este estudio, se tiene que la red de distribución primaria que transporta el agua desde la planta de tratamiento La Ayurá hasta el sector del puente de la Aguacatala es conocida como “conducción Ayurá-Aguacatala” en este tramo de red se derivan dos redes que son conocidas como los ramales de Campestre y Parras.

En el puente de la Aguacatala la conducción se divide en dos redes por lo que en ese punto inician se nombran estas dos conducciones como Aguacatala puente Guayaquil y Aguacatala Colcafé.

Existen también redes de distribución primaria que son conocidas como “**impulsiones**” y son aquellas que llevan el agua inyectada por un sistema de bombeo, análogamente las redes que surten de agua a los sistemas de bombeo cuando estos no se alimentan de un tanque de almacenamiento son denominadas como “**succiones**”.

En el listado maestro de tramos de redes de distribución primaria de EPM, se tiene un total de 147 tramos identificados discriminados como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1 Tipo de Tramos de Red del Sistema de Distribución Primaria

Tipo de tramo de red	Total
Conducción	67
Ramal	42
Impulsión	36
Succión	2
Total General	147

6.1.3.3.2 Tanques de almacenamiento de agua potable

Como su nombre lo indica, son las estructuras que tienen como función principal el almacenamiento del agua potable que conforman la reserva operativa y la reserva de emergencia del sistema.

De los tanques de almacenamiento se derivan las redes de distribución secundaria las cuales conducen el agua hacia los puntos de entrega a los usuarios. Los tanques tienen la función de almacenar la reserva operativa que en otras palabras es el volumen de agua que se requiere

para suministrar el servicio ininterrumpidamente a los usuarios que se encuentren conectados al circuito que abastece el tanque.

La operación de los tanques es sencilla en las horas de mínimo consumo el nivel del tanque alcanza su máxima capacidad es decir se llena, y una vez iniciado el periodo de mayor demanda, el sistema pueda abastecer a los usuarios con el volumen almacenado y no se presenten cortes del servicio.

Se puede afirmar que es un sistema dinámico que alcanza los niveles máximos de almacenamiento en las horas de baja demanda y los niveles mínimos de almacenamiento en las horas de alta demanda.

Para abastecer la demanda de agua potable en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, EPM cuenta con 115 tanques, los cuales brindan una capacidad de almacenamiento de 429 516 metros cúbicos de agua.

Los tanques del sistema de distribución primaria objeto de estudio son en su mayor parte de concreto reforzado (100), fibra de vidrio (3) y vidrio fusionado al acero (13), son de geometría circular y rectangular.

Los volúmenes de almacenamiento de los tanques que EPM tiene en el sistema de distribución primaria, van desde los 36 m³ hasta 24 000 m³ y se clasifican según su capacidad de almacenamiento como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2 Capacidad de Almacenamiento de los Tanques de EPM en el Valle de Aburrá

Capacidad de almacenamiento	Total
de o a 5000 m ³	74
de 5000 a 10000 m ³	20
mayores a 10000 m ³	21
Total, general	115

6.1.3.3.3 Sistemas de bombeos

Los sistemas de bombeos son los encargados de suministrar la energía requerida para que el agua pueda llegar a aquellos sitios a los cuales no alcanza a llegar por gravedad.

EPM tiene instalados un total de 38 sistemas de bombeo en la infraestructura de distribución primaria, para llevar el agua a los tanques más elevados del sistema y que no se alcanza a abastecer por gravedad.

6.1.3.3.4 Válvulas

Existen varios tipos de válvulas y accesorios que hacen parte integral de un sistema de distribución primaria, con una función operativa para cortes e interrupciones del flujo, regulación del caudal, vaciado de redes y expulsión o admisión de aire, entre los más relevantes están:

Válvulas de línea: son las válvulas que tienen como función cortar el flujo del agua en tramos de redes de conducción y pueden ser tipo mariposa, flujo anular y compuerta.

Válvulas de arranque: son las válvulas que están al inicio de cada conducción y tienen como función cerrar el flujo de agua de la conducción o ramal a que pertenecen, son de tipo flujo anular o mariposas.

Válvulas de entrada a tanques: son las válvulas que se encuentran a la entrada de los tanques y su función principal es controlar el caudal de ingreso a la estructura de almacenamiento, son de tipo flujo anular.

Válvulas de descargue: son las válvulas que abren o cierran las tuberías que descargan al sistema de alcantarillado las redes de conducción cuando se requiere vaciar un tramo de red para realizar algún tipo de intervención o mantenimiento, normalmente son de tipo compuerta.

Válvulas ventosas o esféricas: son elementos que sirven para admitir o expulsar el aire de las redes de conducción, normalmente se instalan en los puntos altos de las redes donde se forman picos o deflexiones.

Válvulas de cheque o anti-retorno: son las válvulas que impiden que el flujo se devuelva cuando se corta el suministro en una red, están diseñadas de tal forma que la compuerta se cierra una vez se corta el flujo de agua en la tubería, impidiendo que el fluido retorne a su punto de origen.

Para la operación del sistema de distribución primaria EPM cuenta con un total de 770 válvulas:

Tabla 3 Tipos de Válvula presentes en el Sistema de Distribución Primaria

Tipo de válvula	Total
Cheque	4
Compuerta	380
Esférica	59
Flujo Anular	165
Mariposa	125
Mariposa ECL	2
VRP	2
Pendiente por catalogar	33
Total, general	770

6.1.3.4 Sistema de Distribución Secundaria:

Es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conduce el agua desde los tanques de almacenamiento hasta los puntos de consumo.

6.1.3.4.1 Redes de distribución secundaria:

Son las redes que salen de los tanques y que tienen la función de transportar el agua potable hasta las domiciliarias de acueducto.

Generalmente se instalan subterráneamente y se utilizan materiales que sean de fácil manipulación e instalación y que soporten presiones moderadas que no superan las 100 psi.

Las redes de distribución secundaria se diferencian de las redes de distribución primaria porque de ellas se derivan las domiciliarias de acueducto.

El sistema de distribución acueducto operado por EPM en el Área Metropolitana del Valle de Aburra, está segmentado en una serie de subsistemas denominados “Circuitos” a su vez cada

circuito esta segmentado en sub-circuitos que son controlados por Estaciones Reguladoras de Presión (ERP).

El circuito se denomina con el mismo nombre del tanque que lo surte, que puede ser uno, dos o hasta tres tanques con el mismo nombre diferenciados por numerales. A modo de ejemplo los tanques Popular 1 y Popular 2 abastecen el circuito “Popular”.

Siguiendo este orden de ideas, se puede definir que un circuito es el conjunto de redes, elementos y accesorios que se abastecen un sector determinado del sistema de distribución secundario de acueducto y que se surten generalmente de uno o dos tanques.

El sistema de distribución secundaria de acueducto del área Metropolitana del Valle de Aburra cuenta con un total de 86 circuitos, los cuales a su vez tienen un total de 756 sub-circuitos asociados cada uno a una Estación Reguladora de Presión.

Para una mejor comprensión de la manera como se conforma el sistema de distribución secundaria de acueducto, se presenta a continuación en forma esquemática:

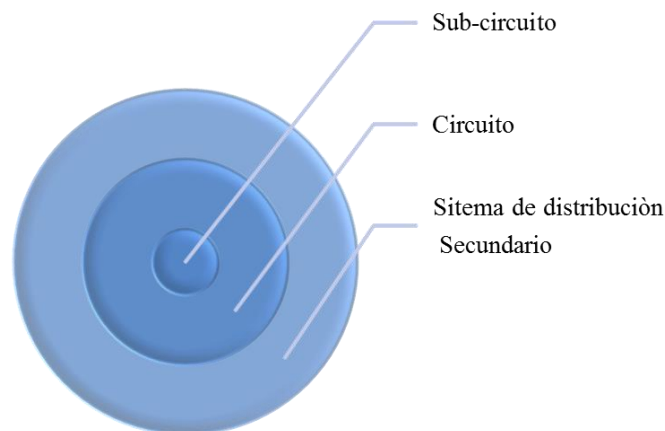


Gráfico 5 Conformación de un circuito de distribución de agua potable

Se tiene una extensión de 3 446 km de redes de distribución secundaria instalada, los principales materiales que se encuentran son:

- Policloruro de Vinilo (PVC) 70,13%
- Hierro Dúctil (HD) 12,58%
- Hierro Fundido (HF) 06,97%
- Otros materiales 10,32%

El material predominante es el PVC dado que las exigencias de presión en las redes de distribución secundaria son menores a las de distribución primaria, la norma determina que la presión máxima en la red debe ser de 86 psi, además el PVC es un material liviano de fácil instalación.

Es bueno precisar que en la actualidad materiales como el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) han tomado fuerza en construcción y reposición de las redes de distribución secundaria, lo anterior debido a las bondades de este material que permite un mayor ángulo de deflexión, reduciendo la instalación de accesorios como codos, además las tuberías de PEAD tienen una vida útil mayor y menores costos de mantenimiento gracias a que son más resistentes a los esfuerzos punzantes y a las sobrepresiones lo que a largo plazo la hacen más económicas.

Los tubos de PEAD generalmente se unen por termofusión lo que le permite comportarse como una sola pieza reduciendo los puntos de empalme y eliminando la necesidad de anclajes ya que fricción del terreno aplica la fuerza necesaria para que el tramo de red no se desplace.

Por estas razones en la actualidad EPM está instalando este tipo de material en las redes de distribución secundaria por lo que se espera que el porcentaje de este material crezca dramáticamente en los próximos 10 años.

6.1.3.4.2 Estaciones Regulatoras de Presión (ERP)

Como su nombre lo indica son las encargadas de regular las presiones en los sub-circuitos para garantizar que las presiones de servicio no sobrepasen lo establecido en la norma y que las redes no presenten daños asociados a altas presiones, especialmente en los puntos más bajos del sistema.

La ERP la compone la Válvula Reguladora de Presión (VRP) que es el elemento encargado de reducir o quebrar la presión, el ByPass que es una tubería paralela a la red, la cual permite realizar mantenimientos sobre la VRP, sin necesidad de interrumpir el servicio y la estructura en concreto o caja de válvula, que es la que integra toda la ERP.

6.1.3.4.3 Válvulas

Existen varios tipos de válvulas y accesorios que hacen parte integral de un sistema de distribución secundario, con una función operativa para cortes e interrupciones del flujo, regulación del caudal, vaciado de redes y expulsión o admisión de aire, entre los más relevantes están:

Válvulas de línea: son las válvulas que tienen como función cortar el flujo del agua en tramos de redes, circuitos o a la salida de tanques y pueden ser tipo mariposa y compuerta.

Válvulas de salida de tanques: son las válvulas que se encuentran a la salida de los tanques y su función principal es controlar el caudal de salida.

Válvulas de descargue: son las válvulas que abren o cierran las tuberías que descargan al sistema de alcantarillado las redes de distribución secundaria cuando se requiere vaciar un tramo para realizar algún tipo de intervención o mantenimiento, normalmente son de tipo compuerta.

Válvulas ventosas o esféricas: son elementos que sirven para admitir o expulsar el aire de las redes de distribución secundaria, normalmente se instalan en los puntos altos de las redes donde se forman picos o deflexiones.

Válvulas de cheque o anti-retorno: son las válvulas que impiden que el flujo se devuelva cuando se corta el suministro en una red, están diseñadas de tal forma que la compuerta se cierra una vez se corta el flujo de agua en la tubería, impidiendo que el fluido retorne a su punto de origen.

Para la operación del sistema de distribución secundaria EPM cuenta con un total de 35901 válvulas:

Tabla 4 Tipos de Válvula presentes en el Sistema de Distribución Secundaria

Tipos de válvulas	Total
Cheque	3
Compuerta	35540
Esférica	2
Globo	1
Mariposa	103
Ventosa efecto doble	129
Ventosa efecto simple	121
Ventosa efecto triple	2
Total, general	35901

6.1.3.4.4 Hidrantes

Son los elementos destinados al abastecimiento de agua para atender emergencias, especialmente incendios, el RAS lo define como “Elemento conectado a la red de distribución que permite la conexión de mangueras especiales utilizadas en la extinción de incendios.” (RAS, 2010).

La norma exige que los hidrantes se instalen en tuberías con un diámetro mínimo de 75 mm (3 pulgadas) y a una distancia máxima entre ellos de 300 m. Cada hidrante debe poseer una válvula para aislarlo de la red. Se ubicarán preferiblemente en las esquinas, en las intersecciones de dos calles y sobre la acera, para un mejor acceso (RAS, 2010).

Para la operación del sistema de distribución secundaria EPM cuenta con un total de 6 308 Hidrantes:

Tabla 5 Hidrantes del Sistema de Acueducto por Diámetro y Zona

Diámetro [mm]	Zona		Total
	Zona Sur	Norte	
75	1765	1229	2994
100	209	178	387
150	1994	933	2927
Total, general	3968	2340	6308

6.1.4 Operación y Mantenimiento de sistemas de distribución de agua

Los conceptos de operación y mantenimiento de un sistema de distribución de acueducto, son las actividades que buscan garantizar el buen funcionamiento del sistema y van íntimamente ligadas.

A continuación, se da una breve definición de cada concepto y una explicación para entender mejor y diferenciar una actividad de otra:

Operación: Es el conjunto de acciones externas que se desarrollan cotidianamente sobre un sistema, para lograr que el mismo preste el servicio acorde a las necesidades y a las exigencias de la demanda.

Mantenimiento: Es el conjunto de acciones internas que se realizan en los componentes de un sistema en aras de prevenir y reparar los daños que puedan ocasionar un mal funcionamiento del sistema.

Una forma de diferenciar la operación de un sistema del mantenimiento es el punto de acción de la actividad, es decir si la acción se realiza al exterior del elemento se considera como operación y si se realiza al interior se considera mantenimiento (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2010).

Para entender mejor este concepto, se debe considerar como acción externa el abrir o cerrar una válvula o una compuerta, poner en marcha o detener el funcionamiento de un sistema de bombeo o un motor, estas acciones no modifican los elementos manipulados ni ninguna de las partes que lo componen; mientras que, cambiar la compuerta o el vástago de una válvula, los rodamientos de la bomba, un tramo de red por ejemplo; serán labores de mantenimiento, ya que modifican la estructura intrínseca del equipo por medio de acciones internas (Consortio Plan Maestro Bolívar, 2010).

Es necesario resaltar que la operación y mantenimiento del sistema, es esencial en la prestación del servicio en términos de continuidad, calidad y cantidad, por tal motivo las empresas prestadoras del servicio tienen en estas áreas la mayor inversión de recursos ya que de

una adecuada gestión en la operación y el mantenimiento se derivan unos indicadores favorables en términos de ingresos, aseguramiento de la calidad y satisfacción de los clientes.

Varios autores coinciden afirmando que las actividades de Operación y Mantenimiento (O&M) son el componente de mayor duración durante el ciclo de vida de las edificaciones, del mismo modo los costos de mantenimiento son los más grandes (Róka Madarász, Mályusz, & Tuczai, 2016). Los sistemas de distribución primaria y secundaria de acueducto no son ajenos a esta realidad, y la operación y mantenimiento demandan una inversión de recursos considerable.

Es ahí que el costo del mantenimiento se convierte en una variable determinante para la sostenibilidad del negocio y la rentabilidad de las empresas prestadoras del servicio de agua potable, el cual debe ser medido y monitoreado para ser incluido en las estrategias de ahorro de costos a largo plazo de las organizaciones.

Lo más aconsejable es establecer un programa de Mantenimiento Preventivo desde que el sistema o activo entra en operación, buscando de esta forma reducir a futuro, los requerimientos de mantenimiento correctivo, los cuales generalmente se materializan como daños o fugas, generando traumatismos en la operación del sistema, altos costos de reparación, pérdida de imagen de la empresa ante la comunidad y pérdidas económicas por concepto de lucro cesante por interrupción en la prestación del servicio.

El sistema de acueducto que opera actualmente EPM para abastecer el servicio de agua potable a los municipios de Medellín, Caldas, Sabaneta, Envigado, La Estrella, Itagüí, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa, tiene un total de 1 059 204 suscriptores, para atender una población aproximada de 4 000 000 de habitantes.

Históricamente el mantenimiento correctivo y preventivo del sistema de distribución lo realizaba personal vinculado directamente a EPM, escenario que demandaba equipos de trabajos numerosos conformados por ayudantes, oficiales, conductores, técnicos, tecnólogos e ingenieros, además de vehículos, equipos, herramientas y locaciones para su operación, generando costos operacionales elevados, lo que se traducía en una baja rentabilidad, y aumentaba los riesgos asociados a la sostenibilidad y competitividad de la empresa. Dada esta situación y alineados con las tendencias mundiales de optimización de recursos y minimización de costos operacionales, a las cuales EPM no ha sido ajena, las directivas de la empresa implementaron durante las últimas dos décadas una política de tercerización de las actividades que no hacen parte del *Core Business* y paralelamente la reducción de la planta de personal operativo. La estrategia consiste en suplir las necesidades de mantenimiento de la infraestructura, por medio de procesos de contratación que ejecutan las firmas contratistas que cuentan con experiencia demostrable y trayectoria en el sector de la construcción.

La Unidad Operación y Mantenimiento Provisión Aguas (UOMPA), antes Área Distribución Acueducto (ADA), ha implementado en su estrategia de mantenimiento desde el año 2006, la elaboración y publicación de procesos de contratación para atender las actividades de mantenimiento correctivo inherentes a los sistemas de Distribución Acueducto. Lo anterior ha permitido contar con los recursos necesarios para la atención del mantenimiento del sistema de manera oportuna, con calidad técnica y con unos costos operacionales competitivos.

6.1.4.1 Operación de sistemas de distribución de agua

La operación del sistema de acueducto, como se definió en el numeral anterior, consiste en actividades cotidianas de naturaleza simple que son necesarias para la normal prestación del servicio acorde a las exigencias de la demanda.

Se puede clasificar la operación del sistema en dos tipos:

Operación de gestión: consiste en las actividades relacionadas con el manejo de la información, planeación y toma de decisiones para atender las eventualidades que surjan a diario en el sistema. Es en este punto donde se analiza la información extraída del sistema como lo son los niveles de los tanques, las demandas máximas horarias, las suspensiones del servicio por causas de daños o mantenimientos preventivos los mínimos nocturnos, el nivel de los embalses, la rata de potabilización de las plantas entre otras, todo esto para la toma de decisiones en aras de garantizar la mayor eficiencia en la prestación del servicio.

EPM cuenta en la estructura administrativa con la Unidad Operación Integrada Agua y Saneamiento (UOIAS) la cual se encarga de centralizar todo el manejo de la información referente a la operación del sistema, además controla todas las intervenciones sobre la infraestructura, es la unidad encargada de aprobar o desaprobar cualquier suspensión del servicio o trabajo sobre el sistema de acueducto.

Operación de ejecución: Consiste en la ejecución de las actividades definidas en la Operación de gestión y están íntimamente asociadas a las actividades que desarrolla el personal técnico en campo como lo son:

- Apertura y cierre de válvulas.
- Encendido y apagado de sistemas de bombeo.

- Paradas e inicio de plantas de tratamiento.
- Cierre y apertura de tanques de almacenamiento.
- Regulación de presiones en las estaciones de regulación.
- Aumento o disminución de caudal a las salidas de las plantas.
- Cortes programados del servicio de acueducto.

Al interior de EPM es la Unidad Operación y Mantenimiento Provisión Aguas (UOMPA) la encargada de realizar las actividades de operación de ejecución, para este propósito se cuenta con un número considerable de cuadrillas conformadas por oficial ayudante y conductor, que día a día realizan las labores definidas en la operación de gestión y acorde a las necesidades y demandas del sistema.

6.1.4.2 Mantenimiento de sistemas de distribución de agua

Se entiende por mantenimiento el conjunto de trabajos y actividades que se realizan para garantizar la óptima eficiencia del servicio o función que realizan máquinas, edificios, objetos o sistemas dentro de una organización (Céspedes, 1985).

A finales del siglo XVIII y comienzos del XIX, con la revolución industrial y la aparición de las maquinas en los procesos productivos, aparece también la necesidad de reparar las fallas que en dichas maquinas presentaban, surge entonces los conceptos de competitividad y costos, planteando a las organizaciones la problemática de los paros de producción asociados a los daños (Linares, 2012).

El sistema de distribución de acueducto puede compararse de cierta forma a un sistema de producción en línea, ya que, si algunos de sus componentes fallan, se genera el paro de toda la línea de distribución o parte de ella, lo que acarrea perdidas económicas porque cada minuto de

parálisis en la línea de distribución cuesta lo que se dejó de producir y vender (Linares, 2012), a lo anterior se deben sumar los costos de la reparación y el costo reputacional y de imagen, ya que por tratarse de un servicio público, los usuarios perciben en tiempo real las fallas del sistema, a diferencia de las fabricas donde se afecta la producción pero esta afectación no la siente inmediatamente el usuario final.

En los sistemas de distribución acueducto se presentan en mayor proporción los mantenimientos correctivos y preventivos, y en una menor proporción se realizan mantenimientos más avanzados como lo son los predictivos o los mantenimientos Cero Horas (Overhaul), estos últimos se presentan principalmente en los sistemas de bombeo y/o equipos electromecánicos de las plantas, mientras que los dos primeros se presentan en las redes, válvulas e hidrantes y demás accesorios que conforman la red de distribución primaria y secundaria del sistema. Esta situación se presenta debido a la complejidad de los sistemas y la baja inversión en tecnologías y metodologías de vanguardia que puedan hacer evolucionar el mantenimiento en el sector de la construcción y en especial en el sector del agua potable.

Es de común conocimiento que los mayores avances en el tema de mantenimiento se han presentado en las empresas de producción industriales, a diferencia del campo de la construcción y en especial en el sector de redes de distribución de agua, donde se presenta un bajo desarrollo en este ámbito.

No obstante, algunas de las metodologías de buenas prácticas productivas desarrolladas en el sector industrial, han sido tomadas y adaptadas para el sector de la construcción, obteniendo beneficios económicos, reflejados en mayor productividad y menor desperdicio de recursos.

Lo anterior suscita la necesidad de evolucionar en el tema de mantenimiento de los sistemas de distribución de agua potable y avanzar del mantenimiento correctivo al preventivo, al predictivo y al Overhaul paulatinamente, lo que permitirá una mayor continuidad en el servicio, disminuyendo las interrupciones a causas de los daños, reduciendo el IANC y mejorando los márgenes de utilidad de la empresa o compensando los costos de inversión en la adopción de mantenimientos más avanzados con los ahorros por reparaciones e interrupciones del servicio.

En la siguiente imagen se puede visualizar esquemáticamente, como algunos autores han graficado los tipos de mantenimiento en forma piramidal, acorde a su orden cronológico de aparición:



Gráfico 6 Pirámide Esquemática de los tipos de Mantenimiento Adaptado de (Linares, 2012).

Se debe tener claro que no todas las estrategias desarrolladas en los procesos industriales, son aplicables a la construcción y en especial al mantenimiento de los sistemas de distribución de agua, ni siquiera en los proyectos que se componen de una serie de etapas que se pueden asimilar a las características de una línea de producción industrial, la diferencia consiste en que la producción industrial está configurada por una serie de actividades repetitivas, de ciclos de

producción cortos y de condiciones de fabricaciones estándar, mientras que las operaciones de construcción y mantenimiento están sujetas a diversas actividades no repetitivas, de duración variable y en condiciones diversas que impiden una estandarización óptima (I. Loera, G. Espinosa, C. Enríquez, & J. Rodríguez, 2013)

Generalmente el mantenimiento de las infraestructuras antiguas de acueducto, puede ser más costoso que el reemplazo con un nuevo sistema que satisfaga tanto las necesidades futuras de demanda y calidad del agua del sistema de distribución. (U.S. Fire Administration & Hickey, H, 2008).

En el ámbito nacional para la operación y el mantenimiento del sistema de conducción y distribución acueducto de nivel de complejidad alto, las empresas prestadoras del servicio de agua potable deben contar con programas de mantenimiento correctivo y preventivo (RAS, 2000).

En EPM se tiene considerado este aspecto, por tal motivo una vez una red de distribución de acueducto muestra síntomas de fallas recurrentes que incrementan los costos de mantenimiento correctivo, son objeto de análisis y diseño para su cambio, de esta manera se moderniza paulatinamente la infraestructura y se busca mantener el indicador de daños en un bajo nivel, cuando son proyectos de reposición de redes a nivel de circuitos o subcircuitos, se diseñan contratos específicos por tratarse de extensiones grandes de redes a reponer. Cuando la necesidad de reposición es imperativa y se trata de Pequeños Tramos (PQT) estas reposiciones se ejecutan con los contratos objeto del presente trabajo y hacen parte de un componente de inversión del cual no se va a ahondar en el presente trabajo por tratarse de actividades con una

tipología diferente al mantenimiento correctivo y de la cual se tiene un mejor control y por ende no hacen parte del problema del caso de estudio.

6.1.4.2.1 Mantenimiento correctivo

Con la aparición de la producción en serie, cuyo pionero fue Henry Ford, las fabricas establecieron unos programas de producción, los cuales se veían truncados por las fallas en las maquinas y/o la infraestructura, lo que demando la creación de equipos que pudiesen realizar las reparaciones en el menor tiempo posible, así surgió la primera generación del mantenimiento que se denominó correctivo (1773-1938) (Linares, 2012).

En este orden de ideas el mantenimiento correctivo es el conjunto de acciones o labores necesarias para efectuar reparaciones o cambios de emergencia, al verse afectada la producción, ya sea por interrupción de la misma o por simple falla de equipos auxiliares de apoyo a la maquinaria principal.

Como se mencionó en la introducción de este trabajo, el mantenimiento correctivo que realiza EPM a las redes e infraestructura de distribución primaria y secundaria de acueducto, es realizada en su mayor proporción por empresas contratista expertas en el tema de reparaciones de daños en redes y obras complementarias.

Actualmente la estrategia está planteada de la siguiente manera:

Para las redes e infraestructura de distribución primaria: se cuenta con un contrato cuyo objeto es: “Mantenimiento correctivo y preventivo, construcción y adecuación de la infraestructura civil y mecánica, en los procesos de captación, potabilización, conducción y distribución acueducto”, el cual se encarga de realizar todas las obras civiles derivadas de la ocurrencia de daños en las redes de distribución primaria, entre las más relevantes están:

- Excavaciones.
- Botada de escombros.
- Llenos con materia de préstamo (arenilla y base granular)
- Reconstrucción de pavimentos flexibles y rígidos.
- Muros de contención.
- Pilas, anclajes.
- Extensión y reposición de redes de distribución primaria.
- Pintura de redes metálicas expuestas a la intemperie.
- Obras mecánicas en la reparación de daños (soldaduras, cortes con plasma...).

El área de influencia de este contrato es toda el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y los municipios de Guarne, El retiro y La Ceja donde se tiene infraestructura de captación y aducción de agua para potabilizar.

Para las redes e infraestructura de distribución secundaria se cuenta con dos contratos cuyo objeto es: “Mantenimiento, reposición, extensión y construcción de redes, acometidas y obras accesorias de la infraestructura de las redes de acueducto de EPM” los cuales se encargan de realizar todas las reparaciones en redes hasta 12” de diámetro y domiciliarias de acueducto, además de las obras complementarias, entre las más relevantes están:

- Reparación de redes hasta 12”.
- Reparación y cambio de acometidas.
- Reparaciones en caja de medidor.
- Extensión y reposición de redes de distribución secundaria.
- Excavaciones.

- Botada de escombros.
- Llenos con materia de préstamo (arenilla y base granular)
- Reconstrucción de pavimentos flexibles y rígidos.
- Muros de contención.
- Pilas, anclajes.

El área de influencia de estos contratos es toda el Área Metropolitana del Valle de Aburrá divididos por el costado oriental por la calle 49 y en el costado occidental por la calle 44 en el municipio de Medellín.

Para el caso de distribución secundaria, las redes de diámetro mayor a 12” son reparadas por el personal vinculado a la empresa debido al alto grado de dificultad que tienen estos trabajos y que demandan un personal experto en la ejecución y control de las actividades además de la utilización de equipos de mayor envergadura. Análogamente en distribución primaria, es el personal vinculado a EPM el que ejecuta las actividades de reparación y el contratista presta labores de apoyo y ejecuta las obras complementarias.

6.1.4.2.2 Mantenimiento Preventivo

Con el surgimiento de la segunda guerra mundial, la demanda de todo tipo de productos se incrementó, pero paradójicamente la oferta de mano de obra disminuyó sensiblemente, obligando a las empresas a la mecanización de sus procesos y aumentar la complejidad de sus instalaciones lo que trajo consigo la necesidad de una mayor confiabilidad y disponibilidad de los equipos e instalaciones en búsqueda de una mayor productividad, es en ese punto de la historia donde surge la idea de que si se tenía un amplio conocimiento de las máquinas, sus características de funcionamiento, fecha de instalación, se podía prevenir las fallas realizando cambios de piezas o

elementos antes que colapsaran, es en ese punto donde nace lo que ahora conocemos como mantenimiento preventivo (Linares, 2012).

El mantenimiento preventivo es entonces aquel conjunto de acciones o labores que pueden ser previstas con suficiente anticipación, de tal forma que se planifiquen o se programen adecuadamente tanto en la manera de realizarlas como en su tiempo de ejecución.

EPM ha desarrollado e implementado un programa de mantenimiento preventivo de las redes de distribución primaria y secundaria, en aras de optimizar el funcionamiento del sistema y evitar la aparición de fallas que pongan en riesgo la continuidad y calidad del servicio. A continuación, se describen algunas de las actividades más relevantes de mantenimiento preventivo:

- Programa de control de presiones: consiste en la instalación de válvulas reguladoras de presión que permiten reducir la presión de la red, lo que repercute en un menor índice de daños y una mayor vida útil de la tubería.
- Revisión y operación de válvulas e hidrantes: se realizan recorridos periódicos para analizar el estado de las válvulas de corte del servicio y determinar su estado operacional, por el alto volumen de estos elementos e hace una verificación aleatoria definiendo criterios de criticidad de la válvula.
- Pintura de redes metálicas aducciones: consiste en limpiar por medio de chorro abrasivo de arena las tuberías metálicas expuesta a la intemperie, generalmente las aducciones y aplicar una nueva capa de pintura que permita alargar la vida útil de la tubería, protegiéndola de la exposición directa del metal al ambiente, retardando los procesos de corrosión.

- Calibración de Estaciones Reguladoras de Presión: se tiene un programa de cambio y calibración de los elementos en las estaciones reguladoras de presión, con el fin de garantizar que las mismas estén funcionales el mayor tiempo posible y mantengan estable la presión en los circuitos minimizando la aparición de daños.

6.1.4.2.3 *Mantenimiento Predictivo*

Una vez establecido el mantenimiento preventivo, se evidenció que en muchas ocasiones se realizaban cambios de piezas y desmonte de máquinas que aún no habían cumplido su ciclo de vida, generando costos innecesarios de mantenimiento, ya que se sustituían piezas en buen estado, lo que llevo a una nueva generación de mantenimiento fundamentado en técnicas de inspección de parámetros físicos como vibraciones, temperaturas y sonidos, para la predicción de las fallas, antes *que estas ocurrieran, a este tipo de mantenimiento lo denominaron como Mantenimiento Predictivo* (Linares, 2012).

El mantenimiento predictivo requiere de personal especializado, por la complejidad de los datos técnicos y el método científico de trabajo, además requiere la adquisición de equipos especializados como analizadores de vibraciones, termómetros, megóhmetros entre otros (Linares, 2012).

Para la infraestructura de distribución acueducto, los mantenimientos predictivos se dan para los sistemas de bombeo y equipos electromecánicos como actuadores electrónicos y válvulas telecomandadas. Por tal razón no se ahondará en este concepto ya que estas actividades no hacen parte de la problemática que se aborda en este trabajo.

Como se establece en la norma de Inspección, Evaluación y Mantenimiento de Ductos Submarinos desarrollada por el Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y

Organismos Subsidiarios, a los ductos se le pueden realizar pruebas basadas en el estado de la tubería para predecir posibles puntos de fallas (Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios, 2013) , estas pruebas se ajustan a la definición de mantenimiento predictivo y son totalmente aplicables a redes de conducción de agua, siempre y cuando estas no se encuentren enterradas.

Las pruebas consisten en inspecciones visuales, líquidos penetrantes, partículas magnéticas e inspección con equipos de ultrasonido.

Otro tipo de inspección en redes que se puede enmarcar en el mantenimiento predictivo es el análisis de espesores de redes metálicas, la verificación constante de asentamientos del terreno bien sea con el levantamiento topográfico de elementos determinados o el monitoreo de inclinómetros, análisis que permiten prever situaciones que puedan generar fallos a las redes o tanques por movimientos en masa del terreno o por pérdida de espesores de las tuberías.

6.1.4.2.4 Mantenimiento Overhaul

Consiste en la realización de un mantenimiento mayor planificado y programado a un equipo, línea o planta. Para esta actividad se interrumpe completamente el funcionamiento de los elementos sometidos a este trabajo con el fin de realizar la intervención.

Principalmente se realiza a plantas cuyo proceso productivo es de flujo continuo y en las cuales no se cuenta con los equipos de respaldo (ACIEM, 2017).

Para un sistema de acueducto este tipo de mantenimientos aplican para las plantas de tratamiento de agua potable donde cuyo proceso productivo es de flujo continuo y que en ocasiones no cuenta con unidades redundantes que permitan hacer intervenciones sin la

necesidad de parar totalmente la producción. No se profundizará en este tema debido a que no hace parte del alcance del trabajo.

Para redes de distribución de acueducto los *overhaul* se presentan cuando se aplican técnicas de rehabilitación de tramos de tuberías, generalmente con la utilización de un compuesto tubular (manga) impregnado con resina epóxica de última generación que se utiliza como revestimiento interior de la tubería existente y que se instala por reversión con presión de aire (PAVCO, 2017). Esta técnica hace parte de las nuevas tecnologías denominadas excavación sin zanja y es conocida como CIPP por sus siglas en inglés *cured in place pipe* que traducidas al español significa Tubería Curada en el Sitio.

6.1.5 Outsourcing o Tercerización de Actividades

El Outsourcing, conocido también como tercerización, consiste en la práctica por la cual una empresa u organización contrata a otra entidad para que manufacture un bien que haga parte de su producción, preste algún tipo de servicio, como de consultoría o de aseo, o se encargue de desarrollar actividades propias de la empresa pero que no hagan parte del *core business* o actividad principal de la empresa debido a que lo anterior es la razón de ser de ella. Se podría traducir literalmente la palabra Outsourcing al español como la fuente abastecedora que se encuentra afuera, en vez de estar dentro de la compañía (Insourcing). En palabras textuales de Antonio Romero:

El Outsourcing (Tercerización o subcontratación) es una nueva práctica de administración, que consiste en la entrega a terceros de algunos procesos que no forman parte de la actividad principal del negocio; permitiéndole a las organizaciones, concentrar los esfuerzos en las actividades que son la razón de ser de las mismas, con la finalidad de obtener competitividad y

resultados tangibles. Es un proceso de gestión que involucra cambios estructurales de las organizaciones en aspectos fundamentales como la cultura, procedimientos, sistemas, controles y tecnología (Romero, 2017).

6.1.5.1 *Perspectiva Histórica del Outsourcing*

La historia del Outsourcing no tiene una clara trazabilidad, como se puede observar en diferentes artículos que han abordado dicha temática. (Dorwin, 2004), (Weinert, S. & Meyer, K, 2005) & (Mainstream Management , 2012). Sin embargo, se puede notar una tendencia histórica en ellos en donde se puede afirmar que sus inicios tempranos se radican en el siglo XX, en donde su principal elemento característico fue la externalización de actividades manufactureras a países asiáticos como China, India y Vietman de productos por compañías radicadas en países desarrollados como los Estados Unidos de América. Posterior a esto las compañías de tecnología adoptaron metodologías similares entre las que se incluían la manufactura de partes, el desarrollo de software por terceros e inclusive actividades muy puntuales como lo son el mantenimiento de aplicaciones, el soporte a usuarios, la gestión de redes, y las operaciones de los centros de datos (Weinert, S. & Meyer, K, 2005). Lo anterior generó un bucle de retroalimentación en compañías de diferente índole las cuales con el fin de reducir costos, mejorar la eficiencia y eficacia en tiempo y dinero, y concentrarse en actividades base de su negocio fueron tomando la decisión de ir tercerizando la mayor parte de sus actividades internas como lo son la atención al cliente, la gestión del recurso humano, el mercadeo, la contabilidad, los diseños, el aseo entre muchas otras, hasta el punto de que se ha llegado a afirmar que el subcontratar la mayor cantidad de actividades que no hacen parte del *core business*, se ha convertido en un elemento central de la nueva economía (Grossman, G & Helpman, E, 2005).

6.1.5.2 Tercerización en Ingeniería Colombiana

La tercerización ha sido un modelo de negocio que actualmente está presente en la mayoría de los sectores de la economía entre los cuales se destaca la ingeniería y la construcción. Si bien es una dificultad para las grandes empresas cumplir con la ejecución completa de obras de infraestructura mucho más es una imposibilidad para las PYMES, pequeñas y medianas empresas, por lo que la legislación colombiana ha permitido que la subcontratación sea un acto legal ante la ley nacional y juegue un papel muy importante en el desarrollo de la economía del país.

El gobierno colombiano ha reconocido que la compra y contratación pública es un asunto estratégico por lo cual decidió crear Colombia Compra Eficiente por medio del Decreto Ley 4170 de noviembre 3 de 2011. (Colombia Compra Eficiente, 2017), con la finalidad de formular políticas, planes y programas buscando optimizar la oferta y demanda en el mercado de compra pública, la racionalización normativa para una mayor eficiencia de las operaciones y el desarrollo y difusión de las políticas, normas e instrumentos para facilitar las compras y contratación de bienes y servicios en el sector público. Todas estas políticas se enmarcan en un sistema de contratación (tercerización) para el normal funcionamiento del estado.

Es por esto que en el país tanto las empresas privadas como públicas tienen subcontratación con otras empresas, haciendo que el Outsourcing se convierta en uno de los principales motores de la fuerza laboral del país, en donde cada empresa se distribuye, a modo de división del trabajo, un sector específico de la economía, para concentrarse en su razón de ser y proveer resultados eficientes.

6.1.5.3 Tercerización en EPM

En lo relacionado al mantenimiento de la infraestructura de distribución acueducto, las primeras actividades que se tercerizaron en EPM, fueron los llenos con material de préstamo de zanjas y apique y la pavimentación de los mismos, también se implementaron contratos para la construcción y cambios de domiciliarios de acueducto.

Para la década de los 90, se elaboró un contrato adicional para la instalación de hidrantes nuevos y a finales de esa década se da origen al primer contrato de mantenimiento de redes de acueducto en la zona centro de Medellín, comprendida entre la calle 30 y la quebrada la Iguaná en el occidente y la calle 30 y la calle 86 en el oriente.

Al inicio del nuevo milenio se incorporó un nuevo contrato de mantenimiento para atender los daños y obras accesorias en las redes y acometidas de la zona norte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, comprendida por el occidente desde la quebrada la Iguana hacia el norte y por el oriente desde la calle 86 hacia el norte incluyendo los municipios de Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa.

En el año 2010 se crea el contrato de mantenimiento acueducto para la zona sur del área Metropolitana del valle de Aburrá comprendida desde la calle 30 en los costados oriental y occidental hacia el sur incluyendo los municipios de Envigado, Itagüí, La Estrella, Caldas y Sabaneta y el corregimiento de San Antonio de Prado.

Para el año 2014 se crea un nuevo contrato de mantenimiento únicamente para las actividades relacionadas con redes de distribución primaria, donde su mayor componente son las obras civiles, como muros de contención, cajas para válvulas, excavaciones, botadas de

escombros y llenos. Este contrato surge de la necesidad de estas obras en los trabajos de mantenimiento de la infraestructura de distribución primaria.

6.2 Estado del arte

6.2.1 Contexto Internacional

Según cifras de UNICEF y la Organización Mundial de la Salud (OMS), más del 90% de la población mundial, tiene acceso a fuentes mejoradas de agua potable (UNICEF y OMS, 2015).

De manera lógica, son los países desarrollados los que cuentan con mayor cobertura de sistemas de agua potable, y usualmente el porcentaje de cobertura de sistemas de agua mejorada es un indicador del desarrollo o subdesarrollo de las regiones.

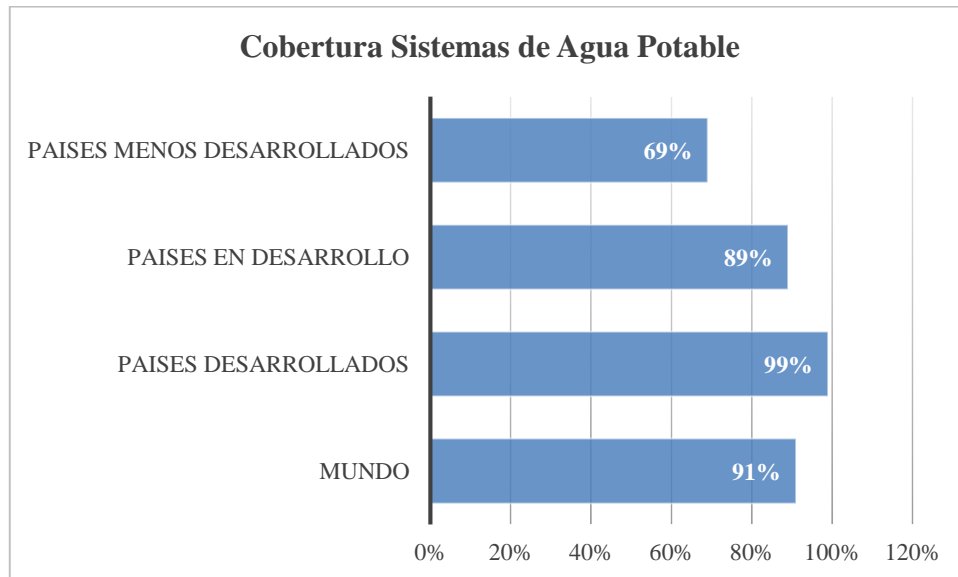


Gráfico 7 Cobertura Sistemas de Agua Potable en el mundo por regiones. Fuente. Adaptado de (UNICEF y OMS, 2015)

Al verificar los datos de cobertura de sistemas de agua mejorada por regiones, se aprecia que, a mayor nivel de desarrollo, existe una mayor cobertura y en las regiones más pobres y/o subdesarrolladas se evidencia una deficiente cobertura.

Uno de los países desarrollados que afronta dificultades en la Operación y Mantenimiento de su Acueducto es Japón, debido a la disminución de sus clientes, caída en los ingresos y falta de transferencia de los conocimientos a causa del envejecimiento de la mano de obra y la escasez de trabajadores (Hasuka, 2015, pág. 585).

La solución planteada por los autores del artículo referenciado apunta a la creación y sostenimiento de asociaciones público-privadas para la conservación de la infraestructura en buenas condiciones además de la implementación de tecnologías de vanguardia lo cual se puede lograr a través de la tercerización parcial en la cual las empresas contratistas se encargan de limitados rango de actividades hasta la Privatización Total de las Compañías de Acueducto Japonesas. (Hasuka, 2015, pág. 590)

En el Medio de ambos extremos se encuentran otras alternativas las cuales se mencionan a continuación en el siguiente gráfico en donde se puede ver además el nivel de riesgo asumido por el operador Privado y las Actividades que se asumen en cada Modelo de Negocio:

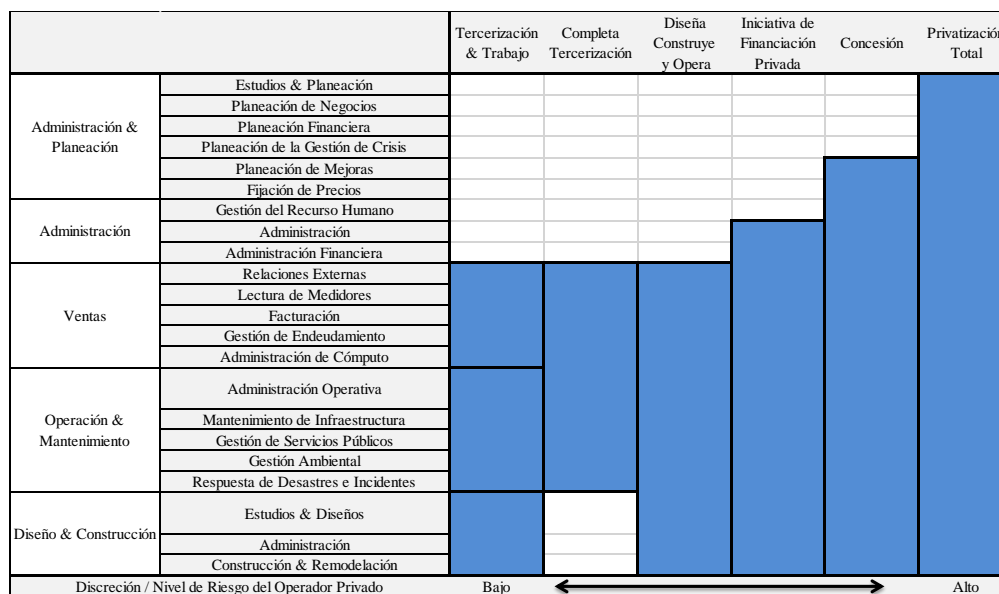


Gráfico 8 Modelos de negocios de Asociación Hitachi. Fuente adaptado de (Hasuka, 2015, pág. 586)

Por el contrario, otros países como la India obedecen según su 73 Enmienda que todos los sistemas de abastecimiento de agua potable rurales sean operados y mantenidos por cuerpos locales, lo que es equivalente a entidades gubernamentales. Lo anterior aunque ha logrado cubrir el 85% de los 850 millones de habitantes rurales para el año 2012, no deja de requerir mejoras en los desafíos del sistema de acueducto, en especial en su operación y mantenimiento.

(Government of India, 2013)

Por último al analizar el Contexto Internacional, se encuentra que el caso Europeo requiere de intervención pública debido a características de consumo, inversión y producción como lo es el caso del 60% de la Infraestructura de Acueducto Europea o en el caso mínimo controles de políticas de regulación muy cercanos. Estas alternativas permiten modelos de negocio desagregados como los que se observan en las industrias de la telecomunicación y la energía lo que permite que la competencia entre las compañías contratistas produzca una mayor

probabilidad de aumentar la eficiencia, una mejor relación de precio y costo y un constante aumento de la Innovación. (Boscheck, 2013, pág. 138)

6.2.2 Contexto Regional

En México la Comisión Nacional del Agua CONAGUA consciente del escenario de escasez casi absoluta del Valle de México que tiene disponibilidad natural de agua per cápita de sólo 101 metros cúbicos por habitante por año instauró el programa E001, el cual se compone de cuatro sistemas que suministran agua en bloque (entregar cantidades determinadas del líquido a otras poblaciones) para diferentes usos, y que son administrados y operados por la CONAGUA, un organismo administrativo desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de carácter estatal. (CONAGUA Comisión Nacional del Agua , 2016)

En el sector latinoamericano varias empresas han incursionado para su prestación de servicios tercerizados a las empresas de acueducto regionales, una de ellas es la Española Indra Sistemas, S.A. la cual afirma tener contratos de consultoría, Soluciones BPO (Business Process Outsourcing) y Soluciones & Servicios de Tecnologías de la Información con Agua y Saneamiento de Toluca (México), Agua de Hermosillo (México), Aguas Andinas (Chile), Aguas de Antofagasta (Chile) (Empresa del Grupo EPM), Aguas Nuevas (Chile), Essbio S.A. (Chile), Copasa (Brasil), Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias (Chile), IDAAN - Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (Panamá), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (México), Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (México), Hidrocapital (Venezuela), OPERAGUA IZCALLI O.P.D.M. (México), OSE , Obras Sanitarias del Estado (Uruguay), SABESP (Brasil), SEDAPAL (Perú), SOAPAP - Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Puebla (México), Superintendencia de Servicios

Sanitarios (Chile), Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (Costa Rica), y Agua y Saneamientos Argentinos S.A. (Argentina) (Indra Sistemas, S.A., S.F.).

Se observa además que las dificultades enunciadas al inicio de este trabajo sobre la tercerización de las actividades de Mantenimiento de Acueducto se observan también en las partes más desarrolladas de la región, como es el caso de Canadá en donde se encontró que en diferentes comunidades ha existido dificultad para encontrar contratistas calificados para ejecutar las actividades de mantenimiento. (Government of Newfoundland and Labrador, Prepared by: Conestoga-Rovers & Associates, 2010).

6.2.3 Contexto Local

Como se mencionó en la introducción del trabajo, con la reforma del régimen de los servicios públicos domiciliarios adoptada mediante la Ley 142 de 1994, se desmonopolizó la prestación de los servicios públicos y se le abrió la participación al sector privado. (Banco Interamericano de Desarrollo, 2013)

Una perspectiva contempla que el mantenimiento realizado de esta forma ha venido presentando resultados mejores a los que se obtenía en el pasado con trabajadores de recurso propio, un ejemplo de esto lo da el caso de Chocó, en donde se destacó el mejoramiento de la continuidad, el control de fugas y la optimización de la potabilidad de las aguas que se entregan a los usuarios. (Guisado, 2013). Por el contrario, algunos autores como Javier Rozo Vengohechea ven con cierto recelo a la tercerización, (Roza, 2017) el cual afirma que la participación del sector privado (PSP) en los servicios de acueducto y alcantarillado en Colombia ha venido aumentando considerablemente en el país desde la emisión de la ley 142 de 1994, lo que tiende a futuro a posibles privatizaciones totales de empresas prestadoras de servicios públicos, pero en ningún momento en su artículo menciona los resultados obtenidos antes y después de las participaciones del sector privado.

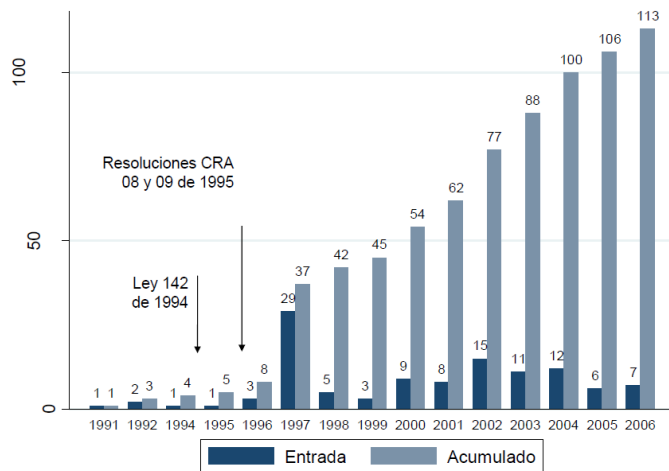


Gráfico 9 Evolución del número de municipios con principal operador con PSP. Tomado de (Rozo, 2017)

Las dificultades en el mantenimiento de acueducto también se presentan en otras principales ciudades del país como es el caso de Cali, en donde para el año 2016 el concejal Albeiro Echeverry advirtió que: “El panorama es preocupante, especialmente por la situación que enfrenta Acueducto y Alcantarillado, con pérdidas de agua potable del 57 %. Según el Concejal, a la fecha hay 283 órdenes represadas para la atención de daños de acueducto en la ciudad y 867 instalaciones nuevas de servicio de agua potable pendientes. Hoy en la ciudad tenemos más de 300 daños de acueducto, que botan agua potabilizada por más de 24 horas, hay daños desde hace tres y cuatro meses. Incluso, encontramos un daño que lleva 10 meses en la desembocadura del Canal Interceptor Sur.” (El País, 2016).

Un claro ejemplo de la eficiencia obtenida a partir de la inversión de capital privado en las empresas de servicios públicos en Colombia es la de Acucar, Aguas de Cartagena S.A. E.S.P., una empresa mixta, que en su reporte de sostenibilidad para el año 2016 en el apartado de gestión integral para la sostenibilidad del agua menciona que en cuanto al control de pérdidas obtuvieron

un índice de agua no contabilizada del 31.31% el cual es menor al promedio colombiano y latinoamericano del 43% y 40% respectivamente y quienes con su programa de control activo de fugas identificaron 127 fugas en red y 1 022 fugas en domiciliarias en el año 2016 evitando de esta manera las pérdidas de agua contribuyendo a su ahorro en la ciudad. (Aguas de Cartagena S.A. E.S.P, 2017).

Otro ejemplo que se puede obtener del anterior mencionado informe de sostenibilidad de Aguas de Cartagena S.A. E.S.P es la incursión de nuevas y competitivas tecnologías de la información como lo es la aplicación informática Aquadvanced encargada de hacer seguimiento a caudales y presiones la cual permite la activación de alarmas que son fundamentales para controlar las pérdidas técnicas. (Aguas de Cartagena S.A. E.S.P, 2017).

Del análisis del contexto local se puede afirmar la tendencia que existe a nivel nacional de implementar capital privado en diferentes modalidades desde la tercerización hasta la privatización parcial, lo cual no ha tenido una acogida positiva en los empleados públicos de las empresas prestadoras de servicios públicos pero que pese a todas estas críticas ha mostrado desde 1994 una clara mejora en la operación y el mantenimiento de los sistemas de acueducto de Colombia.

Para ambos casos Las Empresas Públicas de Medellín cuentan con cuadrillas que ejecutan actividades del mantenimiento preventivo y contratos que ejecutan las actividades de mantenimiento correctivo.

En la elaboración de los presupuestos de obra para contratar las actividades de mantenimiento correctivo se tienen en cuenta las variables típicas que conforman un análisis de

precios unitarios (APU), tales como: materiales, equipos, mano de obra, herramienta menor, transporte.

Es necesario evaluar como impactan estas variables el valor unitario de las actividades y como otras variables que generalmente no se contemplan en la estructuración de los APU, pueden tener una incidencia en el aumento de los precios unitarios.

6.3 Avances en Investigación

6.3.1 Antecedentes del Análisis de Productividad

Desde el siglo XX se han venido manifestando esfuerzos sistemáticos para analizar y mejorar la productividad en los procesos, principalmente en aquellos relacionados con la industria y la producción en masa, siendo un claro ejemplo el Toyota Production System.

La compañía Toyota Motors, es reconocida a nivel mundial por sus aportes al análisis de la productividad, quienes crearon el Toyota Production System (TPS), el cual es, según ellos mismos dicen (TOYOTA, 2017) “A production system which is steeped in the

philosophy of "the complete elimination of all waste" imbuing all aspects of production in pursuit of the most efficient methods”, es decir, un Sistema de producción que está impregnado en la filosofía de “la completa eliminación de todos los desperdicios” teniendo en cuenta todos los aspectos de la producción en la búsqueda de los métodos más eficientes.

Como se puede esperar, los resultados obtenidos para la industria automotriz si bien en esencia fueron una fuente de inspiración a seguir por la industria de la construcción, estaban lejos de ser aplicables directamente en ella, debido a las diferencias tan marcadas que hay entre ambas industrias, siendo la más relevante el hecho de que los operarios de la industria actúan sobre un

mismo lugar de trabajo equipado con lo necesario y bajo condiciones muy controladas, mientras que los obreros de construcción trabajan in-situ, en lugares de los que no se tiene control debido a variaciones topográficas, climatológicas, de orden social, y de muchos otros factores.

Es por lo anterior que se requirió de adaptaciones al modelo, una de ellas la realizó el Profesor Lauri Koskela en 1992 con su trabajo “Aplicación de la nueva filosofía de producción a la construcción” (Porrás, H, Sánchez, O, & Guerra, J, 2014) y luego de él se fueron desarrollando nuevos conceptos de productividad aplicados al sector de la construcción, lo que se fue conociendo en el medio como “Lean Construction”, lo cual se puede traducir como construcción con pocas pérdidas (en la revisión de la literatura generalmente se ha encontrado la traducción más común como “Construcción Sin Pérdidas”, definición que no es muy apropiada, debido a que el buscar eliminar las pérdidas de la construcción en su totalidad involucra un gasto energético superior a la construcción misma, y es por ello que lo que se busca con la metodología no es eliminarlas, sino minimizarlas)

En el año 2004, Luis Fernando Botero publica una “guía de mejoramiento continuo para la productividad en la construcción de proyectos de vivienda” en la que propone la filosofía del “Lean Construction” como estrategia de mejoramiento basado en una prueba piloto que el mismo realizó en 2002 con un grupo de constructoras en la ciudad de Medellín y concluyó que para la implementación de programas de mejoramiento se recomienda la medición y evaluación mediante modelos cuantitativos como el muestreo de trabajo, para obtener la productividad asociada a los proyectos civiles (Botero, L & Álvarez M, 2004)

En 2012, Al-Aomar realizó un análisis de las prácticas de “Lean Construction” en la industria de la construcción en Abu Dhabi en el cual pretendía responder a la pregunta de cuáles

eran los desperdicios de construcción en Abu Dhabi y cuáles eran sus principales causas encontrando al final de su investigación 27 tipos de desperdicios de construcción, los cuales enmarcados en los siete tipos más comunes de desperdicios en Lean Construction arrojaron como más común a los defectos (Errores y Construcciones) seguidos por los sobreprocesamientos y las demoras (Al-Aomar, 2012).

En su Tesis de Maestría, Sergio Arboleda, de la Universidad Nacional de Colombia desarrolla un análisis de productividad, rendimientos y consumo de mano de obra en procesos constructivos, en donde según la metodología de Lean Construction, se analizan medidas de la distribución de tiempo en obra, bien sea en tiempos Productivos (TP), tiempos Contributivos (TC), y tiempos no-contributivos (TNC). (Arboleda, 2014)

En 2015 SooWon publica un artículo en el cual se estudió el proceso de construcción de una edificación de cinco pisos, en donde se realiza el análisis de productividad, enfocándose en los recursos, las actividades, duraciones, materiales, procedimientos, manuales y tecnología usada. Al final se concluye sobre los índices de Eficacia General del Trabajo (Overall Labor Effectiveness) obtenidos en campo, y proporciona unas recomendaciones a los administradores de la construcción. (Chang, S & Son, J, 2014)

6.3.2 Antecedentes de los rendimientos de mano de obra

Desde los inicios de la revolución industrial ha existido el concepto de las tasas de producción por hombre de un producto en particular. Lo anterior indica la cantidad de tiempo que se requiere para la producción de un bien por individuo o bien la cantidad de tiempo que toma un individuo en la realización de un proceso o una parte de él.

Dichos conceptos eran fundamentales a la hora de estimar la cantidad de producción partiendo de una cantidad de trabajadores establecidos para un tiempo dado, pero ha perdido mucha relevancia en el área industrial debido principalmente a que la producción actual de muchos bienes no depende de la eficiencia de los seres humanos sino de las máquinas.

Una ilustración contemporánea del fenómeno anteriormente mencionado se está viendo en la empresa Taiwanese multinacional Foxconn Technology Group, quienes producen unidades tecnológicas de hardware para clientes altamente influyentes en la economía global como Google y Apple, y quienes han tomado la decisión gerencial de instalar más de un millón de robots a la vez que han sido reportados en los medios locales de haber reemplazado tres cuartos de los trabajadores con máquinas. (Schulz, 2013).

Mientras que el concepto de rendimientos de mano de obra humana pierde cada vez más relevancia en el campo de la producción industrial, ha venido a su vez ganando importancia en la construcción, debido a la implementación de metodologías como *Lean Construction* las cuales toman prestado todo lo aprendido a lo largo de los últimos años en producción industrial para traerlos al negocio de las construcciones civiles, las cuales por dificultades intrínsecas como la localización, el clima, la escasez de mano de obra calificada, entre muchas otras, hace que se requiera urgentemente aplicar nuevas metodologías que permitan controlar los tiempos de ejecución y los costos asociados a cada proyecto.

En el año 2002, Luis Fernando Botero publica un artículo titulado Análisis de Rendimientos y consumos de mano de obra en actividades de construcción, en el cual conformó una base de datos sobre consumos de mano de obra incluyendo los factores que inciden sobre

dicho consumo. El estudio fue realizado por seis meses en actividades de construcción de proyectos de vivienda de interés social en mampostería estructural (Botero, 2002)

En 2014, Aldemar Remolina y Lina Polanco publican un artículo en el cual se consolidan los antecedentes teóricos, metodología y los resultados obtenidos de la investigación que realizaron sobre el análisis de rendimientos de Mano de Obra en algunas de las actividades de construcción ejecutadas en el Edificio J del Campus de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Se presentaron los datos obtenidos y se encontró diferencias de hasta el 70% entre los resultados obtenidos en campo en comparación con valores de referencia, que en su caso fueron obtenidos de la base de datos de Construdata. (Remolina, A & Polanco, L.M, 2014).

En 2007, Carolina Hernández Celis en su trabajo de grado para optar como Ingeniera Civil, describe la metodología usada, el seguimiento y la medición de la productividad de la mano de obra realizada sobre cuatro actividades específicas en la construcción de proyectos de vivienda en el municipio de Piedecuesta, Santander, creando al final una base de datos normalizada de referencia para obras de características similares. (Hernández, 2007)

En la mencionada Tesis de Maestría de Sergio Arboleda de 2014, además del mencionado estudio de productividad, se efectúa el análisis de rendimientos y consumo de mano de obra efectuado sobre diversas actividades constructivas en veinte edificaciones de Medellín. (Arboleda, 2014)

Carolina Mahecha, en su tesis para optar al título de ingeniera civil, dirigida por Luis Fernando Botero y llamada “Análisis comparativo del rendimiento de la mano de obra en la construcción de un edificio” compara y analiza el rendimiento de la mano de obra que se

encuentra en la base de datos de construdata con el obtenido en campo en su investigación para edificaciones residenciales de la Ciudad de Bogotá. (Mahecha, 2010).

6.3.3 Antecedentes de Movilidad

La ciudad de Medellín y su área metropolitana han tenido un proceso de crecimiento poblacional y densificación a lo largo de las últimas décadas. Conforme se ha venido presentando esta densificación, se han realizado esfuerzos por parte de la autoridad para mejorar la infraestructura vial.

Una descripción de dicha infraestructura en la zona es la siguiente:

La estructura vial del Área Metropolitana del Valle de Aburrá está claramente determinada por la condición del valle y el eje estructurante del Río Medellín, este eje principal, además, estructura la relación de conectividad rural en los municipios del norte y del sur. A lo largo de él se localizan las principales categorías de vía: metropolitanas y municipales incluyendo la línea del Metro, a partir de éstas se desprenden las vías de conexión transversal al Valle, algunas de ellas intermunicipales, y la gran mayoría zonales, todas en función de definir la relación de movilidad entre los barrios de la ciudad. (Área Metropolitana del Valle de Aburrá & UPB, 2007)

Pese a los esfuerzos por mejorar y mantener actualizada dicha infraestructura, la excesiva congestión vehicular que se presenta actualmente en la ciudad y el área metropolitana son evidentes para los habitantes de la región.

Las soluciones que se proponen desde las autoridades públicas corresponden al uso de transporte público, caminatas para trayectos cortos, uso de transportes alternativos como la bicicleta, todo enfocado a la disminución del parque automotor, es decir, de todos los vehículos que circulan por las vías de la ciudad.

Actualmente la Secretaría de Movilidad de Medellín registra 243 499 vehículos matriculados (Febrero de 2016), y se tuvo un Parque Automotor Circulante Estimado para el año 2014 de 1 234 946 vehículos, el cual según la misma Secretaría, ha venido aumentando cada año, y se espera siga aumentando en el futuro próximo.

6.3.3.1 Movilidad de los Contratistas según los Requerimientos del Contrato

La localización de las obras que el contratista debe ejecutar como parte de la construcción y adecuación de la infraestructura civil y mecánica, mantenimiento correctivo y preventivo en los procesos distribución primaria de acueducto atendidos por las Empresas Públicas de Medellín se localiza en todos los municipios que hacen parte del Área Metropolitana, en donde EPM presta sus servicios, lo cual se extiende a los sitios en donde están construidas las captaciones, y toda la red de distribución primaria, comprendida principalmente por las aducciones, conducciones, tanques de almacenamiento, Plantas de potabilización, y demás que conformen parte del sistema de acueducto.

Lo anterior implica la obligación y necesidad que tiene el contratista de movilizarse en un área de influencia del proyecto altamente congestionada de más de 1000 km² (100 000 Hectáreas) y se avisa desde los pliegos del contrato que normalmente, los trabajos son distantes entre sí y, en algunos casos, no se cuenta con acceso vehicular.

Es entonces como las soluciones alternativas al transporte que proponen las autoridades no se hacen relevantes en este caso debido a que por las necesidades constructivas, las cuadrillas de los contratistas deben movilizarse con herramientas y equipos, lo cual hace inviable la movilización en transporte público, bicicletas, y mucho menos a pie.

Se tiene entonces que las cuadrillas del contratista deben movilizarse en vehículos automotores (generalmente camionetas, camiones y carros-taller de grandes dimensiones), llevando al personal, equipos y herramientas, y con ellos debe cubrir grandes distancias dentro del área de influencia del desarrollo del contrato.

En conclusión se hace necesario la evaluación objetiva de la necesidad o no de incluir todos estos factores a la hora de realizar el presupuesto del contrato de mantenimiento y del pago al contratista.

6.3.3.2 *Isócronas*

Después de analizar el estado del arte de la movilidad interurbana, el concepto más pertinente a este proyecto corresponde a las isócronas, las cuales son isolíneas (como las curvas de nivel o Isohipsas, las Isotermas y las Isohietas, entre otras) que conectan los puntos asociados a una misma cantidad de tiempo. Se asocian a estudios hidrológicos, astronómicos y principalmente a la Ingeniería de Transporte, en donde se interpretan como los lugares situados a una misma distancia en tiempo desde un punto determinado.

Hu et Al. propusieron el método de cálculo de isócronas asociadas a la accesibilidad del transporte público y desarrollaron el dibujo de las mismas para la región China de Guangzhou. (Hu, J, Cheng, Z, Zhong, G, & Huang Z, 2013)

Después de estudiar el problema del cálculo de isócronas para redes de carreteras, incluyendo el algoritmo de Dijkstra utilizado para diversas aplicaciones como el geomarketing, planeación urbana y rango para vehículos eléctricos, Valentin Buchhold en su tesis de maestría (2015) evalúa experimentalmente la eficiencia de los algoritmos que describe previamente y

concluye que todos ellos, menos el RangeDijkstra son lo suficientemente rápidos para aplicaciones prácticas. (Buchhold, 2015)

En su tesis doctoral, Markus Innerebner (2012) diseña un sistema para el cálculo de isócronas para redes espaciales multimodales, desarrollando tres algoritmos diferentes, a saber, MDijkstra, el cual aunque eficiente, tiene un alto costo de memoria y se recomienda sr usado si se tiene disponible un servidor con una gran memoria; MINEX, que es acorde para ambientes computacionales en donde la memoria es más importante que el tiempo de ejecución y por último MRNEX, el cual es una compensación entre la memoria y el tiempo de ejecución, y por ende es la mejor decisión para aplicaciones móviles. (Innerebner, 2012)

7 Metodología

7.1 Introducción

El presente trabajo es un caso de estudio empresarial que nace de la necesidad de identificar y cuantificar las variables que inciden en los costos de las actividades de mantenimiento para redes de distribución acueducto en el sistema que opera EPM en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, que obedece a una metodología experimental.

Como se mencionó en el planteamiento del problema este estudio pretende reducir la brecha presupuestal que se ha venido presentando entre los precios ofertados por las firmas contratistas, en comparación con los precios de referencia de EPM.

El proyecto nace como una iniciativa personal del autor, funcionario de EPM, quien presentó la propuesta de estudio a la organización, la cual avaló y patrocinó con el pago de un porcentaje del costo de la matrícula y la vinculación a término fijo a 6 meses de un practicante en tecnología de construcciones civiles y un estudiante de práctica de ingeniería civil y la disposición de los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto, como equipos de cómputo, papelería, transporte, uniformes entre otros.

Para justificar la solicitud de los recursos se definió el siguiente proyecto, el cual contaba con el nombre de “base para análisis de productividad y optimización de presupuesto en las actividades de mantenimiento de la infraestructura de distribución primaria y secundaria de acueducto de los contratistas” y consistía en el levantamiento en campo y procesamiento de una muestra estadística significativa de los recursos utilizados por los contratistas en las labores de mantenimiento de la infraestructura de distribución primaria y secundaria de agua potable que

actualmente opera EPM, determinando tiempos productivos, tiempos contributivos y tiempos no contributivos.

En el capítulo anterior se presentó una aproximación a la amplia documentación acerca de diferentes aspectos relacionados con los temas objeto de este trabajo, donde se ampliaron conceptos y se identificaron estudios relacionados con los temas y aspectos a evaluar. No obstante, se presenta una ausencia en estudios específicos sobre el tema del análisis de presupuesto y variables que inciden en los costos de las actividades de mantenimiento en redes de distribución de agua potable, por lo que se tomaron conceptos de otros estudios en el gremio de la construcción, petrolero y la producción industrial que son 100% aplicables al tema objeto de estudio y que cuentan con un sustento documental y de proceso que los respalda.

Después de la revisión bibliográfica, el análisis del problema y la evaluación de los costos directos, se identificaron que, para este tipo de contrato, los mayores componentes del costo son la mano de obra y el transporte. Al revisar algunos ítems representativos de los contratos, se encontró que los insumos que componen los APU son correctos, pero la mano de obra y el valor del jornal cotizado es alto, además el rendimiento de la actividad es muy bajo y por ello se aumenta el valor en el costo directo, lo que finalmente al afectarlo por el AU, incrementa significativamente el valor de los ítems. Las diferencias no son solo con el precio estimado por EPM, sino que varían sustancialmente entre los diferentes proponentes.

Es de este análisis que se toma la decisión de enfocar el análisis de las variables, productividad, rendimientos y movilidad ya que son estos aspectos los que se identificaron como determinantes en los sobrecostos de las ofertas presentadas.

En el siguiente numeral se describe la manera como se desarrolló el trabajo investigativo y el levantamiento de información conceptual y el estado del arte, las pruebas realizadas durante la investigación en campo, los datos recolectados, el análisis de la información y la forma como se identificaron las variables a estudiar.

7.2 Etapas de ejecución del trabajo de grado

Una vez planteada la problemática a tratar en este trabajo de grado, se procede con la definición de los objetivos general y específicos, la investigación documental para el levantamiento del estado del arte y el marco de referencia, la toma de muestras y trabajo de campo, el procesamiento estadístico de la información, el análisis y por último la presentación de resultados y conclusiones.

7.2.1 Investigación documental

La etapa académica de la maestría inicia en el segundo semestre del año 2015, paralelamente se da inicio a la fase exploratoria, donde se presentan los primeros acercamientos a las bases de datos para la obtención de información sobre los temas objeto de la investigación.

En esta etapa no se obtuvieron resultados satisfactorios debido a la falta de experiencia en búsqueda de información en las bases de datos, por lo que fue necesario a mediados del primer semestre del año 2016, solicitar y realizar el curso de “Búsqueda de información en bases de datos bibliográficas” que es dictado en el programa de formación en competencias informacionales de la biblioteca centro cultural Luis Echavarría Villegas de la universidad EAFIT.

Surtido este trámite, se procede nuevamente con la búsqueda en las bases de datos bibliográficas disponibles en la página web de la biblioteca centro cultural Luis Echavarría

Villegas de la universidad EAFIT del tema específico, con las palabras claves de “Mantenimiento y Operación acueducto, reparación de daños y obras accesorias en redes de acueducto, productividad en actividades de mantenimiento acueducto...”, de las cuales se referencian algunas de las más consultadas: EbscoHost, Construdata.com, Compendex/Engineering Village, ScienceDirect, Scopus, Google Scholar, entre otras, pero nuevamente los resultados son pobres y la información recopilada es nula en cuanto a las necesidades del trabajo.

Dada esta problemática se solicita una revisión bibliográfica al personal especializado de la biblioteca centro cultural Luis Echavarría Villegas de la universidad Eafit, de la cual se adjunta la tabla con la solicitud realizada:

Tabla 6 Datos Asociados a la Consulta Bibliográfica

Tipo de usuario *	Estudiante posgrado
Seccional/Convenio *	Medellín
Programa académico/dependencia *	Posgrado Escuela de Ingeniería
Propósito de la consulta *	Proyecto/Tesis de grado
Tema principal *	Mantenimiento redes de acueducto
Temas complementarios *	Mantenimiento redes servicios públicos Mantenimiento tuberías Movilidad y orden público en la ejecución de obras
Cobertura geográfica *	Mundial
Tipo de material *	Artículos, tesis de grado de posgrados, libros, investigaciones.
Fecha inicial *	Tuesday 1 January 1980
Fecha final *	Friday 12 August 2016
Entrega de resultados *	APA
Medio de la entrevista *	Personal
DOCUMENTO DE AUTORIZACIÓN DE USO DE DATOS PERSONALES	Consiento y autorizo
Leer documento de autorización de uso de datos personales *	

De esta revisión se obtuvo una lista de 39 referencias bibliográficas relacionadas con el tema de acueducto y alcantarillado, pero nuevamente se encontró que la información contenida en estos documentos, no tenía relación directa con los temas objeto de estudio.

Es en este punto de la investigación se decide ampliar el espectro de la misma y se empieza a buscar en las bases de datos bibliográficos, la información de productividad, rendimientos de mano de obra, mantenimiento, tercerización y movilidad entre otras, en áreas afines al sector de la prestación del servicio de agua potable, como es el sector de la construcción, la industria, el sector petrolero, entre otros.

Se inicia entonces la fase del levantamiento del estado del arte y marco conceptual a través de la búsqueda de artículos de investigación procedentes de trabajos de grado de nivel de

pregrado, maestría y doctorado en actividades de construcción en general, debido en su mayor parte a la ya mencionada dificultad de encontrar artículos enfocados en modo particular al mantenimiento de acueducto.

Los artículos encontrados y mencionados como antecedentes en el marco teórico de este trabajo correspondieron casi en su totalidad a estudios realizados en la construcción de edificaciones en cuanto lo asociado a productividad y rendimientos de mano de obra, y relacionados directamente a la movilidad en la parte del trabajo que se enfocó en el desarrollo de las isócronas para entender mejor el comportamiento y la afectación de la movilidad de las cuadrillas de los contratistas a los diferentes frentes de obra en el área metropolitana del Valle de Aburrá.

Para los temas de operación y mantenimiento en sistemas de acueducto, como para el tema de tercerización y contratación, se encontraron documentos específicos que fueron adaptados y homologados a las necesidades del trabajo investigativo.

7.2.2 Investigación de campo

En el primer semestre del año 2016 se incorporan a EPM los recursos solicitados en el proyecto para el desarrollo del trabajo de campo, consistente en un practicante de ingeniería civil y otro en tecnología en construcciones civiles.

Se realizó una contextualización del proyecto y se definieron los roles y responsabilidades de cada integrante bajo la tutoría del autor de este trabajo; al practicante de ingeniería civil se le asignó la responsabilidad de desarrollar el marco teórico para el levantamiento de la muestra estadística, la revisión bibliográfica de lo referente a rendimientos, productividad y tiempos de desplazamiento, además de la elaboración y control de los formatos; el practicante de tecnología

en construcciones civiles, fue encargado de la recolección de información en terreno y diligenciamiento de los formatos.

Se realizaron comités de seguimiento semanales donde se evaluaba el avance del proyecto, la bibliografía consultada, el marco teórico de la muestra estadística y la calidad y veracidad de los datos recolectados, adicionalmente se realizaban visitas aleatorias a los frentes de obra para determinar la idoneidad y calidad de la información recolectada por el tecnólogo en construcciones civiles.

Para desarrollar la investigación de productividad del capítulo ocho, después de revisar las fuentes bibliográficas, se decidió implementar la prueba de los cinco minutos, que consiste en un modo simplificado, a la evaluación de la distribución de tiempo ejecutado por un trabajador aleatorio en cinco minutos, bien sea en actividades productivas, contributivas o no-contributivas. Dichos datos se consolidaban en el formato para la adquisición de datos en campo de la productividad de los contratistas el cual se puede observar en el [apéndice 15.1](#).

En el caso de la evaluación de rendimientos de mano de obra en campo para las actividades constructivas asociadas al mantenimiento del sistema de acueducto se optó por diseñar formatos en los que interesaba básicamente identificar las dimensiones de obra ejecutada de acuerdo a la unidad de medida contractual que podía ser longitud lineal, por área o volumen e identificar la hora inicial y la hora final en la que se desarrollaba parte de esos procesos. Esto se describe con mayor detalle en el capítulo nueve en donde a su vez se explica el análisis estadístico con el que se conformaron los intervalos de validez para la base de datos obtenida a partir de este estudio.

Para el capítulo diez, asociado a la variable de movilidad, se decidió diseñar un formato que identificara y cuantificara datos geográficos y temporales. Los datos geográficos se obtenían

enunciando las localidades desde y hacia las cuales se realizaba el desplazamiento, en un análisis posterior eran ingresadas en el sistema de información geográfico a través de la aplicación Geomedia® la cual asignaba una coordenada espacial a cada dato, lo que permitía hallar distancias radiales. La información de distancias recorridas para cada dato se obtenía utilizando el odómetro de los vehículos en los que se movilizaba el equipo de trabajo de este proyecto marcando un kilometraje inicial y final para cada dato. Los tiempos se tomaban simplemente como la diferencia entre el tiempo final e inicial del recorrido. El detalle de esta metodología utilizada se encuentra en el capítulo diez.

La obtención de los sobrecostos existentes a partir de la ineficiente utilización del recurso humano y la afectación natural que proporciona la movilidad en el valle de Aburrá se logra a partir de la combinación de los resultados hallados en el capítulo ocho en particular del coeficiente de productividad junto con los tiempos de desplazamiento promedio de los contratistas hallados en el capítulo diez.

8 Eficiencia y Productividad de la Mano de Obra en las Actividades de Mantenimiento del Sistema de Distribución de Acueducto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Para la evaluación de la Productividad de la Mano de Obra en las Actividades de Mantenimiento del Sistema de Distribución de Acueducto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá se optó por utilizar la Metodología de la Prueba de los Cinco Minutos o *Five-Minute Rating* (Arboleda, 2014).

8.1 Metodología para la recolección de datos en campo: Prueba de los Cinco Minutos para la Toma de Datos

Dicha metodología adaptada a la investigación propia de trabajo de grado, consistió en la observación de cada uno de los trabajadores del contrato bien sean oficiales o ayudantes de obra durante cinco minutos y de forma aleatoria mientras ejecutaban actividades contractuales de mantenimiento del sistema de acueducto, contabilizando el tiempo que para cada muestra se invertía bien sea en actividades productivas (Tiempo Productivo), contributivas (Tiempo Contributivo), y no-contributivas (Tiempo No-Contributivo), según se define a continuación:

Actividades Productivas: Son aquellas actividades que intrínsecamente agregan valor y se relacionan en el sector de la construcción con aquellas dedicadas exclusivamente a la producción de unidades constructivas. El desarrollo de estas actividades está relacionado directamente con el avance de la obra. El tiempo dedicado a estas actividades se denomina Tiempo Productivo TP.

Actividades Contributivas: Son aquellas actividades que contribuyen a que se desarrollen las actividades productivas, es decir, son labores de soporte las cuales en sí mismas no producen unidades constructivas, pero son requeridas para ello. Algunos ejemplos para ilustrar mejor este

concepto corresponden a obtener y transportar herramientas, realizar mediciones, recibir o dar instrucciones, lectura de planos, aseo de herramientas y limpieza general. El tiempo dedicado a estas actividades se denomina Tiempo Contributivo TC.

Actividades No-Contributivas: Las actividades No-contributivas se definen muy claramente a sí mismas, son aquellas que no producen unidades constructivas y que no son necesarias para el desarrollo de ellas, y por ende no contribuyen al desarrollo del proyecto. Su correcta identificación y clasificación permite abordar las causas más críticas para reducir las pérdidas en la construcción, y por ende aumentar la productividad. El tiempo dedicado a estas actividades se denomina Tiempo No-Contributivo TNC.

Es importante para asegurar una calidad de datos estadística, que se garantice que cada instante de tiempo tenga la misma probabilidad de ser seleccionado, que no exista una aparente orden del tiempo observado, y que cada observación sea independiente de las otras observaciones previamente realizadas.

Dichos datos se consolidaban en una tabla de la cual se extraía la información más relevante para esta investigación entre la que se encontraban datos básicos como fecha y hora, El nombre del responsable de la toma de datos y el lugar en donde se realizará dicha medición; la actividad contractual que se esté ejecutando; el personal evaluado, bien sea un oficial o un ayudante, sin incluir ningún nombre puesto que la prueba no tiene como objetivo medir la productividad de cada individuo, sino de una manera general; tres casillas en donde para cada una se diligencia el tiempo invertido en segundos para actividades productivas, contributivas, o no-contributivas respectivamente y según sea el caso, las cuales deben sumar 300 segundos, puesto que corresponde al tiempo total en cada medición (cinco minutos). Se ingresó una casilla

en donde se pide ingresar la causa del tiempo no-contributivo. Como las causas pueden ser muchas hasta llegar al punto de que sea impráctico y tedioso el organizarlas, además de que se pueda dar muchos nombres a una misma causa, se optó por tomar las categorías de causas más frecuentes encontradas en la literatura relacionada, y permitir que en esta celda sólo se puedan tomar los valores dentro de una lista definida para este proyecto la cual consistió en este caso a:

- Esperas: Corresponden a eventos causados por razones ajenas al personal evaluado en particular, en donde se requiere para seguir trabajando o que una actividad predecesora se finalice, o que se reciba una instrucción, o que se otorguen permisos, o que llegue algún material, herramienta o equipo faltante al sitio de la obra.
- Descanso: Los descansos que se consideraron en este estudio difieren del descanso otorgado y necesario en los tiempos indicados para este fin (Como lo es la hora del almuerzo). Corresponden a periodos considerables de tiempo que un trabajador se toma por voluntad propia para descansar en horario laboral, debido a lo exigente de la actividad o a otras causas.
- Tiempo Ocioso: Tiempo tomado voluntariamente por el personal evaluado, utilizado en actividades no-contributivas como lo es el fumar, conversaciones considerables, entre otras, debido a la falta de supervisión o al estado no-apto del trabajador para realizar su tarea.
- Reprocesos: Corresponde a volver a realizar una actividad previamente efectuada, pero que por condiciones de calidad o de otra índole identificadas por el supervisor o la interventoría tuvieron que ser repetidas para alcanzar el grado de aceptabilidad requerido.

- Desplazamientos: Son desplazamientos internos considerables dentro del frente de obra, los cuales no son necesarios para el avance de obra.
- Otros: Se utilizó una categoría de otros para todas las otras causas que no se pudieron encasillar en las anteriores.

Por último, y para cada actividad contractual, se pide diligenciar que herramientas y/o equipos fueron solicitados para la realización de la unidad constructiva. Lo anterior se justifica debido a que en el pliego de condiciones se relacionan la herramienta y equipos necesarios para lograr el objeto contractual, y este levantamiento ayuda a conservar vigente dichos requerimientos en caso de que por obsolescencia o avance de la tecnología se requiera de nuevos y/o actualizados ítems en este campo.

Se anexa en el [Apéndice 14.1](#) el gráfico que evidencia el formato que se utilizó en la investigación para este trabajo de grado de maestría.

8.2 Confiabilidad Estadística de los Resultados Obtenidos

8.2.1 Tamaño de la Muestra Requerido para una confiabilidad del 95%

Se requiere conocer el tamaño de la muestra requerido para obtener una confiabilidad del 95% según se define para este trabajo de grado, para ello se tiene que, para una población infinita, el número de muestras requeridas corresponde a:

$$n = \frac{z^2 pq}{e^2}$$

Donde:

n = Tamaño de Muestra

e = Margen de Error, en este caso se define del 5%

p = Proporción de la población que posee la característica del estudio, en este caso, como no se conoce, se asume la máxima heterogeneidad según se recomienda en la metodología tomando el valor $p = 0.5$

$$q = (1-p) = (1 - 0.5) = 0.5$$

z = Z-score o Unidad Tipificada. Variable aleatoria discreta tipificada, de unidades adimensionales. Corresponde al número de desviaciones estándar en las que un dato está por encima (o por debajo) de la media aritmética.

Ya se conocen y se definen todos los valores para hallar la población con excepción del valor del Z-score. Para hallarlo se sigue el siguiente procedimiento:

Se desea hallar la muestra para una confiabilidad del 95%. Según el Teorema Central del Límite, se puede definir que si la muestra es razonablemente grande la distribución de la media muestral de cualquier variable se distribuye normalmente. Teniendo esto presente, y debido a que la distribución normal es simétrica, se tiene que

$$P(-z \leq Z \leq z) = 95\% = 1 - \alpha$$

En este caso, alfa (α) corresponde a la parte externa de la distribución normal, es decir a la cola inferior y superior. Despejando para alfa algebraicamente se tiene que:

$$\alpha = 5\%$$

Para aprovechar las propiedades de la función de distribución acumulada, se divide alfa entre dos, para calcular la probabilidad de que z sea menor que Z :

$$P(z \leq Z) = 1 - \frac{\alpha}{2} = 97.5\%$$

Utilizando entonces el inverso de la Función de Distribución acumulada, se tiene que para ese valor de probabilidad, la Unidad tipificada correspondiente es de

$$z = 1.96 [/]$$

Reemplazando entonces para hallar n se tiene que:

$$n = \frac{(1.96)^2(0.5)(0.5)}{(0.05)^2}$$

$$n = 384.16 \approx 384 [Muestras]$$

8.2.2 Cálculo del Nivel de Confianza para el Número de Datos Obtenidos

Para asegurar la confiabilidad del 95% para este estudio se requerían de 384 muestras; como el total obtenido fue superior a dicho valor, se puede reemplazar los datos conocidos para hallar la confiabilidad que con este número de datos se obtiene.

En total para esta Investigación se tomaron 505 muestras de Productividad, teniendo que:

$$n = 505 [Muestras]$$

$$505 = \frac{(z)^2(0.5)(0.5)}{(0.05)^2}$$

Despejando para z se tiene que:

$$z = \sqrt{\frac{ne^2}{pq}}$$

$$z = \sqrt{\frac{(505)(0.05^2)}{(0.5)(0.5)}}$$

$$z = \sqrt{\frac{(505)(0.05^2)}{(0.5)(0.5)}}$$

$$z = 2.25 [/]$$

Tomando el valor para la variable tipificada de $z = 2.25$, se busca ahora reemplazar en los límites de integración indicados para más menos 2.25 desviaciones estándar y así obtener el valor de la confianza. Se utiliza una hoja de cálculo en Excel® que aproxima la integral asociada a la distribución normal siguiente:

$$P(-2.25 < Z < 2.25) = F(x) = \int_{-2.25}^{2.25} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dz \approx 0.97555 \approx 97.56 \%$$

Se tiene entonces en conclusión que el nivel de confianza del estudio de Productividad fue del 97.56% con un margen de error del 5%.

8.3 Resultados del Estudio de Productividad

Los resultados obtenidos a partir de la ejecución de la metodología anteriormente enunciada se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 7 Resultados Análisis General de la Productividad para el Contrato de Mantenimiento Acueducto

	% Tiempo Productivo Total	% Tiempo Contributivo Total	% Tiempo No-Contributivo Total
Productividad Obtenida	36,17%	36,08%	27,74%
Productividad Óptima	60,00%	25,00%	15,00%

Los porcentajes óptimos fueron encontrados en las publicaciones del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile con su

Servicio de Productividad y Gestión, según lo cita Sergio Arboleda (Arboleda, 2014) en su trabajo de grado de maestría, los cuales corresponden a:

- **Porcentaje Óptimo para el Tiempo Productivo: 60%**
- **Porcentaje Óptimo para el Tiempo Contributivo: 25%**
- **Porcentaje Óptimo para el Tiempo No-Contributivo: 15%**

Los resultados obtenidos se visualizan en el Siguiete Gráfico:

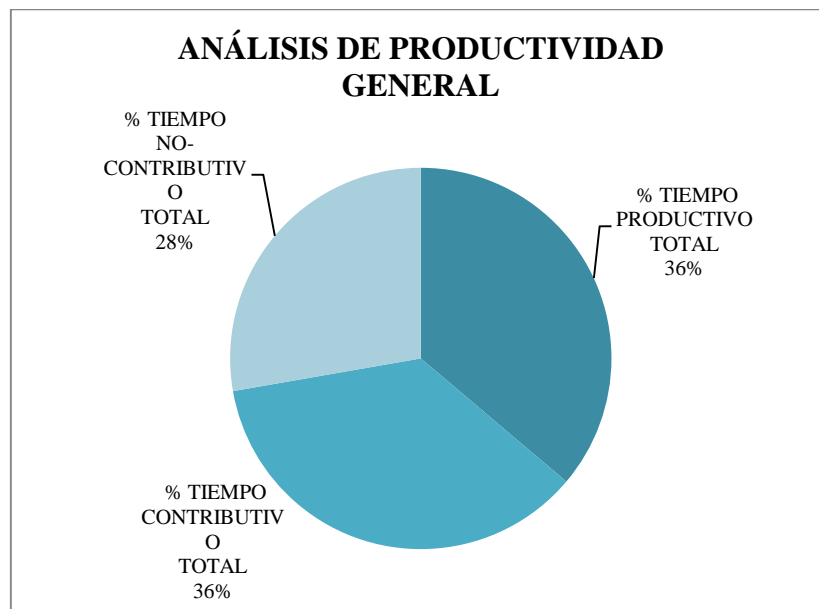


Gráfico 10 Resultados obtenidos del Análisis de Productividad General

Como se aprecia en la tabla 5 existe una considerable diferencia negativa entre la productividad obtenida y la productividad óptima, lo cual es un indicador objetivo de la poca productividad e ineficiencia que se encontró en el desarrollo de las actividades contractuales por parte de los contratistas.

- **Porcentaje Tiempo Productivo:** El porcentaje de tiempo Productivo Óptimo es del 60% mientras que el obtenido fue del 36%, de donde se tiene que se posee un 24% menos de productividad de la que se debería tener.
- **Porcentaje Tiempo Contributivo:** El porcentaje de tiempo Contributivo Óptimo es del 25% mientras que el obtenido fue del 36%, de donde se tiene que se invierte un 11% más de tiempo en actividades contributivas comparado al esperado.
- **Porcentaje Tiempo No-Contributivo:** El porcentaje de tiempo No-Contributivo Óptimo es del 15% mientras que el obtenido fue del 28%, de donde se tienen que existe un 13% más de pérdidas de productividad. Es importante resaltar que este resultado corresponde al porcentaje de tiempo promedio en que una cuadrilla aleatoria del contratista se encuentra realizando actividades no-contributivas para la realización de una actividad aleatoria, en un lugar aleatorio. **Corresponde en otros términos a las pérdidas de Productividad** y por ende es un objeto de mejora. Por las características inherentes del ser humano, es imposible que dicho porcentaje de tiempo llegue a cero, pero siempre es posible mantenerlo lo mínimo posible.

8.4 Causas de Tiempo No-Contributivo

Con el fin de identificar cuáles eran las causas de los Tiempos No-Contributivos se diseñó el formato que se mencionó con una columna en donde se especificaba para cada medición una entre las siguientes causas principales: esperas, descansos, tiempo ocioso, reprocesos, desplazamientos y otros.

De las 505 mediciones realizadas, se encontró que en 164 de ellas se presentaron tiempos no contributivos, de los cuales se pueden observar las causas en la siguiente tabla:

Tabla 8 Número de Incidencias por Causas de TNC Ordenadas de Mayor a Menor

ID	Causa TNC	Incidencias	% Participación
1	Esperas	87	53,05%
3	Descanso	26	15,85%
5	Reprocesos	25	15,24%
4	Tiempo Ocioso	15	9,15%
6	Desplazamientos	5	3,05%
7	Otros	4	2,44%
2	Necesidades Fisiológicas	2	1,22%
Σ		164	

Se puede concluir entonces que las Esperas corresponden a la mayor causa de pérdidas seguido de los descansos informales tomados en medio de la jornada laboral.

8.5 Interpretación y Uso de los Resultados Obtenidos en el Estudio de Productividad

El coeficiente de Productividad corresponde al porcentaje de tiempo promedio en que una cuadrilla aleatoria del contratista se encuentra realizando actividades productivas para la realización de una actividad aleatoria, en un lugar aleatorio.

La importancia de dicho coeficiente radica en su utilidad para la realización de presupuestos y contratos más acercados a la realidad. El coeficiente obtenido de productividad para este estudio fue del 36% (0.36).

Para el cálculo de la mano de obra en los análisis de precios unitarios (APU) se utilizan los rendimientos de mano de obra. Estos rendimientos horarios son tomados en campo durante la ejecución de las actividades productivas por intervalos pequeños de tiempo (Por ejemplo cada media hora, cada hora, etc).

Si esos rendimientos horarios, se multiplican por el número de horas laborales se obtendría en teoría el rendimiento que se tiene para un día laboral. Lo anterior sería cierto sí desde el momento en que se llega a la obra hasta el último minuto se ejecutase la actividad constructiva sin ningún tipo de descanso, tiempo ocioso, reprocesos y demás actividades no-contributivas; y sin contar el tiempo invertido en aseo, preparación de herramientas, acarreo de material, entre muchas otras actividades contributivas.

Del análisis anterior se concluye que existe la necesidad de compensar el modelo matemático con lo observado en campo, lo cual se logra al multiplicar por un factor de afectación que tenga internamente la información solicitada, es decir, el sustraer todo el tiempo contributivo y no-contributivo que se pueda presentar. Lo anterior se logra con el Coeficiente de Productividad (C_p), el cual por definición cumple el propósito de representar solo el porcentaje de tiempo que se invierte en actividades productivas, y por ende, aquellas que están relacionadas directamente con el avance de la obra.

$$Rend_{Efectivos\ Diario} = C_p * Rend_{Horario} * Horas_{Laborales}$$

Es por lo anterior que si se utilizan dichos rendimientos afectados por el factor del Coeficiente de Productividad en vez de utilizar los rendimientos sin ningún tipo de afectación, se llega a un resultado más coherente con la realidad para la determinación de rendimientos de mano de obra diarios, y por ende del análisis de precios unitarios y en instancia final del presupuesto del contrato.

Utilizando el análisis inmediatamente anterior consistente en la obtención de rendimientos diarios efectivos utilizando el coeficiente de productividad se puede aplicar ahora al cronograma o programación de obra.

Los Rendimientos de Mano de Obra Diarios Efectivos son los más adecuados a la hora de estimar cuantos días va a tomar el desarrollo de una obra de infraestructura. Su razón es que no sólo toma en cuenta cuando tiempo en promedio tarda una cuadrilla realizando una actividad productiva sino que adicionalmente toma en cuenta todo el tiempo invertido en actividades contributivas necesarias para el desarrollo del proyecto y el tiempo perdido en actividades no contributivas.

La muestra de ello corresponde al hecho de que generalmente la duración de la ejecución de obra tarda más que lo estipulado en la programación inicial. Esto debido a que no se suele utilizar valores medidos en campo de rendimientos de mano de obra, además de que no se suele afectar por ningún factor de seguridad, como el Coeficiente de Productividad, lo que indica que se asume que el proyecto se va a realizar en las condiciones más favorables posibles, sin ningún tipo de pérdidas de tiempo, lo cual sería algo ideal, pero que no corresponde a la realidad constructiva, al comportamiento humano, y a los factores de los cuales no se tiene control.

En conclusión, una programación más ajustada a la realidad se obtendría si para ella se utilizara el coeficiente de productividad para la afectación de los rendimientos de mano de obra horarios, los cuales, multiplicados por el número de horas de la jornada laboral, y obteniendo el inverso (o consumo de mano de obra diario) y multiplicando dicho valor por la cantidad de obra a ejecutar, daría el resultado en días que tomaría la duración de una determinada actividad constructiva.

9 Rendimientos de mano de obra de mantenimiento de la infraestructura de acueducto de EPM.

Para analizar las tasas de producción de las actividades de mantenimiento de la infraestructura de acueducto de EPM se utilizará el concepto de rendimiento de mano de obra. Luis Fernando Botero (Botero, 2002) define el rendimiento de mano de obra y el consumo de mano de obra de la siguiente manera:

Rendimiento de mano de obra: Se define rendimiento de mano de obra, como la cantidad de obra de alguna actividad completamente ejecutada por una cuadrilla, compuesta por uno o varios operarios de diferente especialidad por unidad de recurso humano, normalmente expresada como um/hH (unidad de medida de la actividad por hora Hombre).

Consumo de mano de obra: Se define como la cantidad de recurso humano en horas-Hombre, que se emplea por una cuadrilla compuesta por uno o varios operarios de diferente especialidad, para ejecutar completamente la cantidad unitaria de alguna actividad. El consumo de mano de obra se expresa normalmente en hH/um (horas-Hombre por unidad de medida) y corresponde al inverso matemático del rendimiento de mano de obra. (p. 11)

9.1 Metodología de Recolección de Datos en Campo

Se procedió a realizar medidas de rendimientos de mano de obra en campo. Se decidió para mayor precisión y con coherencia a las metodologías encontradas en el levantamiento del estado del arte, tomar los rendimientos de mano de obra por hora, en vez de medirlos por día como suele realizarse en otros contextos. La principal causa de ello fue el contar con el estudio de

productividad, el cual combinado con el de rendimientos obtiene los rendimientos diarios efectivos como la multiplicación de los rendimientos horarios por el número de horas de la jornada laboral por el coeficiente de productividad (analizado en el capítulo anterior). Lo cual se puede resumir en la siguiente ecuación

$$Rend_{Efectivos\ Diario} = C_P * Rend_{Horario} * Horas_{Laborales}$$

Se seleccionaba una unidad constructiva evidente, por ejemplo, un pedestal que iba a ser vaciado con hormigón. Se calculaba mediante sus propiedades geométricas la unidad de medida contractual (En el caso del ejemplo, el volumen en metros cúbicos). Se observaba el proceso de fundido anotando la hora de inicio y la hora final que tomaba para cada unidad constructiva. Una vez se tiene la unidad de medida y la duración del proceso constructivo, solo queda definir según lo observado si el rendimiento se va a dar en términos de un hombre o de una cuadrilla. Efectuando la división entre la unidad de medición obtenida en campo sobre la duración, se obtiene el rendimiento por hora asociado a dicho proceso. Todo lo anterior se relacionaba en el formato que está en el [apéndice 14.2](#).

Para el trabajo de recolección de datos, se tuvo en cuenta la configuración de cuadrillas como una pareja conformada por un oficial y un ayudante, en la tabla 7 columnas 6, 7 y 8, se relacionan los rendimientos por cuadrilla y en las columnas 3, 4 y 5 se relacionan los rendimientos por individuo.

9.2 Análisis Estadístico para la Consolidación de la Base de Datos

Basado en Investigaciones previas ((Botero, 2002), (Mahecha, 2010)), para consolidar la base de datos de Rendimientos de Mano de Obra se parte de asumir que los datos obtenidos en campo se distribuyen normalmente.

Para la conformación de Intervalos de Confianza para la Base de Datos Objetivo de esta Investigación se aprovechan las propiedades del Teorema del Límite Central para establecer los límites de Confianza superior e inferior.

Se parte por el Teorema TLC que para una variable aleatoria X con media μ y con desviación estándar σ , que la distribución de las medias muestrales siguen una distribución normal con los parámetros de la media y el error estándar.

El error estándar de la media, es un factor que cuantifica las oscilaciones de la media muestral, y la cual es proporcional a la desviación estándar e inversamente proporcional al tamaño de la muestra, es decir que mientras mayor es la muestra, menor va a ser el error estándar asociado. Lo anterior se expresa matemáticamente cómo:

$$EE_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Una vez definido el Error Estándar se procede, como se mencionó anteriormente, a partir que las medias muestrales se distribuyen normalmente:

$$\bar{X} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$$

Por lo anterior la unidad tipificada Z (Z-score) para este caso no corresponde a la que se haya dividiendo por la desviación estándar solamente, sino por el error estándar que intrínsecamente la incluye de la siguiente forma:

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

Se recomienda remitirse al análisis estadístico de la Productividad en donde se haya la confiabilidad de la muestra y se explica con más detalle la variable tipificada Z y su obtención. Se tiene entonces que para una confiabilidad del 95% (0.95) el valor de la unidad tipificada Z para la distribución normal corresponde a aproximadamente 1.96 desviaciones estándar. Lo anterior se puede expresar y simplificar de la siguiente forma:

$$P(-z \leq Z \leq z) = 1 - \alpha$$

Sustituyendo la definición de Z con el error estándar en la anterior ecuación se tiene después de una manipulación algebraica lo siguiente:

$$P\left(\bar{X} - z\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + z\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 1 - \alpha$$

Para el Alfa definido del 5% (0.05) (Que se deduce a partir de la confiabilidad esperada del 95%)

Se obtiene un $\frac{z}{2}$ de 1.96 y se tiene que:

$$P\left(\bar{X} - 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = 0.95 = 95\%$$

De lo anterior se concluye que el intervalo requerido para una confiabilidad del 95% corresponde a:

$$\left(\bar{X} - 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$$

Esto se debe interpretar como el intervalo en el que se espera que el 95% de las veces se encuentre contenido la media μ . En otras palabras se puede decir con el nivel de confianza del 95% que la media μ yace en el intervalo presentado.

Teniendo en cuenta la media aritmética, y los límites inferiores y superiores obtenidos para cada actividad de obra civil medida, se conforma una base de datos en la cual se toma en cuenta el error estándar y con él la afectación resultante del tamaño de la muestra para cada una de las mediciones realizadas.

Tabla 9 Intervalos con el 95% de Probabilidad para los Rendimientos de Mano de Obra Obtenidos

Actividad	Unidad	Rango de Rendimientos de Mano de Obra [UD/hH]					
		Rend. Individual			Rend. Cuadrilla		
		Bajo	Promedio	Alto	Bajo	Promedio	Alto
Arenado Abrasivo (Sand-Blasting)	m ²	8,46	9,64	10,83	-	-	-
Mampostería en Bloque de Concreto	m ²	0,64	0,85	1,06	-	-	-
Excavación Manual en Material Común	m ³	0,47	0,67	0,88	-	-	-
Excavación Mecánica en Material Común	m ³	5,09	6,91	8,74	-	-	-
Construcción de Andenes en cualquier Material	m ²	-	-	-	1,03	1,87	2,71
Concreto en Elementos Estructurales	m ³	-	-	-	0,36	0,54	0,72
Recubrimiento Aducción	m ²	155,42	250,41	345,41	-	-	-

10 Tiempos Promedio de Desplazamiento a los Frentes de Obra

Los diferentes frentes de obra asociados a la infraestructura civil y mecánica del sistema de distribución primaria y secundaria de acueducto como tanques de almacenamiento de agua potable, plantas de potabilización, cajas para válvulas, aducciones, conducciones, tuberías de distribución y acometidas se encuentran distribuidas en el Valle de Aburrá y sus cercanías, por distancias considerables entre sí. Lo anterior permite concluir que se requiere tener en cuenta esta variable si se requiere realizar presupuestos de referencia para los contratos de mantenimiento de acueducto que sean conformes con la realidad.

10.1 Metodología de Recolección de Datos

Para realizar el estudio se comenzó consolidando la información necesaria de cada medición en un formato (Ver apéndice 14.3) que solicitaba la fecha de toma de cada dato, el lugar de origen desde donde se comienza a tomar el tiempo de desplazamiento, el lugar de destino para el trayecto, la hora y minutos a las que se comienza a realizar el recorrido y se parte del lugar de origen, la hora y minutos a las que se llega al lugar de destino y por último en la sexta y séptima, se tienen el kilometraje con el que se comienza a realizar el desplazamiento y el kilometraje que se obtiene al llegar al destino, respectivamente. Lo anterior se observa con detalle en el [apéndice 14.3](#)

La duración promedio de desplazamiento se halló como el promedio aritmético de todos los desplazamientos evaluados igual a:

$$\textit{Tiempo Promedio de Desplazamiento} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = 47 \text{ [min]}$$

Se calcula la duración del trayecto como la diferencia entre la hora de llegada con la hora de salida ($H_{Llegada} - H_{Salida}$) y se calcula la distancia en kilómetros entre ambos frentes como la diferencia entre el kilómetro final y el kilómetro inicial del recorrido ($km_{Llegada} - km_{Salida}$).

Como se conoce tanto la distancia como la duración entre los lugares del desplazamiento se pudo hallar la velocidad promedio como dicho cociente para cada una de las mediciones realizadas de la siguiente manera:

$$v_{PROM} = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{(km_{final} - km_{inicial})}{(tiempo_{final} - tiempo_{inicial})}$$

Luego de hallar la velocidad promedio para cada valor se procedió a calcular la media aritmética para todos los valores obtenidos en la base de datos para obtener la velocidad promedio general de desplazamiento en el área de influencia del sistema de distribución primaria de acueducto.

$$Velocidad\ Promedio\ General = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$$Velocidad\ Promedio\ General = 23.66 \left[\frac{km}{h} \right]$$

La velocidad promedio de desplazamiento interurbana obtenida para el municipio de Medellín fue muy aproximada a la que publicó el Banco Mundial y el Departamento Nacional de Planeación DNP (Samad, 2012) de 22.65 [km/h]. El error porcentual, considerando la de dicho estudio como teórica, y la obtenida como la experimental fue de:

$$Error [\%] = \left| \frac{V_{teórico} - V_{Experimental}}{V_{teórico}} \right|$$

$$Error [\%] = \left| \frac{22.65 \left[\frac{km}{H} \right] - 22.37 \left[\frac{km}{H} \right]}{22.65 \left[\frac{km}{H} \right]} \right|$$

$$Error [\%] = 1.24 [\%]$$

10.2 Aproximación a Isócronas usando la Velocidad Promedio de Desplazamiento

La ventaja de las líneas isócronas es que por definición no son equidistantes en distancia, pero sí en tiempo, lo que es capaz de reflejar que puede que existan lugares que por su fácil acceso se llegan más rápido que otro posible lugar más cercano pero con una infraestructura vial de menor capacidad o de condiciones más desfavorables.

Con los datos obtenidos en el estudio de movilidad, particularmente de la Velocidad Promedio de Desplazamiento se puede crear una aproximación a las isócronas consistente en partir de cualquier punto de la ciudad de Medellín, y definir que para recorrer la misma distancia en todas las direcciones, o de forma radial, se viaja en promedio a la misma velocidad (realizando la debida corrección).

Para esta parte del proyecto se utiliza el Software GeoMedia® Essentials, el cual es el producto base de la suite GeoMedia®. Permite visualizar y trabajar en el Sistema de Información Geográfico (SIG) permitiendo el acceso a diferentes bases de datos geo-referenciadas (tanto de Sólo-Lectura como de Lectura-Escritura) y la edición básica de datos espaciales.

En un primer momento del análisis se toma como origen principal el lugar que más mediciones presentó, para este caso, la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Villahermosa

sede del equipo Mantenimiento Conducciones y Obras Civiles. Una vez se ubica el Origen-Villahermosa, se comienzan a ubicar los diferentes destinos visitados a los que se les tomó datos de movilidad.

Con cada destino ubicado en el mapa se mide la distancia radial para cada localidad entre el Origen-Villahermosa y el Destino-Xi. Se debe tener en cuenta que también se tomaron los datos en los cuales Villahermosa era el Destino a partir de las diferentes localidades.

Se observa que se discrimina cuando la PTAP de Villahermosa es o bien un origen o un destino, y se tiene para cada campo el lugar hacia donde se iba o desde donde se venía respectivamente. Luego se tiene la duración promedio en horas de desplazamiento la cual se obtuvo como la media aritmética de todos los datos que se tuvieron para cada origen-destino. La distancia promedio de la trayectoria se obtuvo como la multiplicación de la Velocidad Promedio de Desplazamiento y la duración respectiva; Esta trayectoria evidentemente no equivale a una distancia en línea recta sino que refleja las diferentes trayectorias que se pueden tener para la movilización de un punto A a un punto B.

Por último la distancia Radial fue extraída utilizando el mencionado Software GeoMedia Essentials® Utilizando la herramienta Measure Distance (Medir Distancia) utilizando una proyección de acuerdo al sistema de coordenadas.

Se parte de la hipótesis de que ambas distancias, la de la trayectoria y la radial, deben estar correlacionadas de alguna forma. Graficando la dispersión que relaciona dichas variables se tiene lo siguiente:

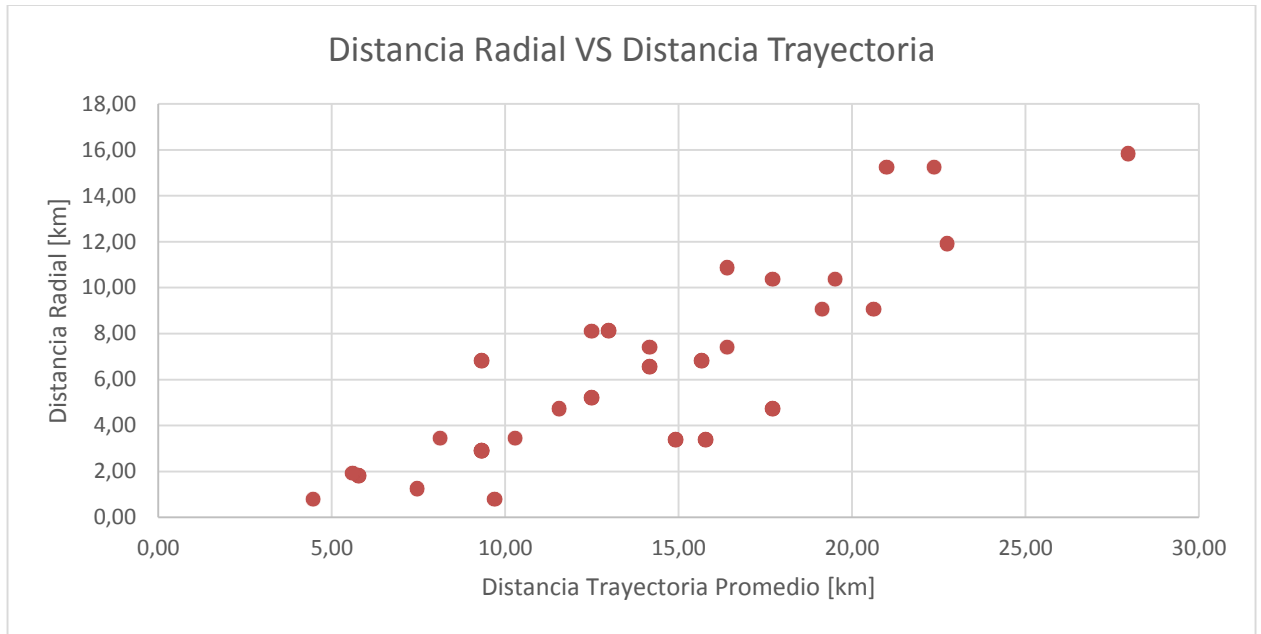


Gráfico 11 Dispersión Distancia Radial VS Distancia Trayectoria

A simple vista se puede observar una relación de proporción entre ambas distancias, lo que indica que evidentemente a mayor distancia radial se requiere una mayor distancia para la trayectoria. Se parte de que la relación entre ambas distancias es lineal. Para ello se realiza un análisis de regresión lineal y se obtiene un coeficiente de R cuadrado (Coeficiente de Correlación de Pearson) de 0.7632 [/], lo cual es un indicador de que existe una correlación positiva significativa entre ambas variables como se puede ver en el siguiente gráfico

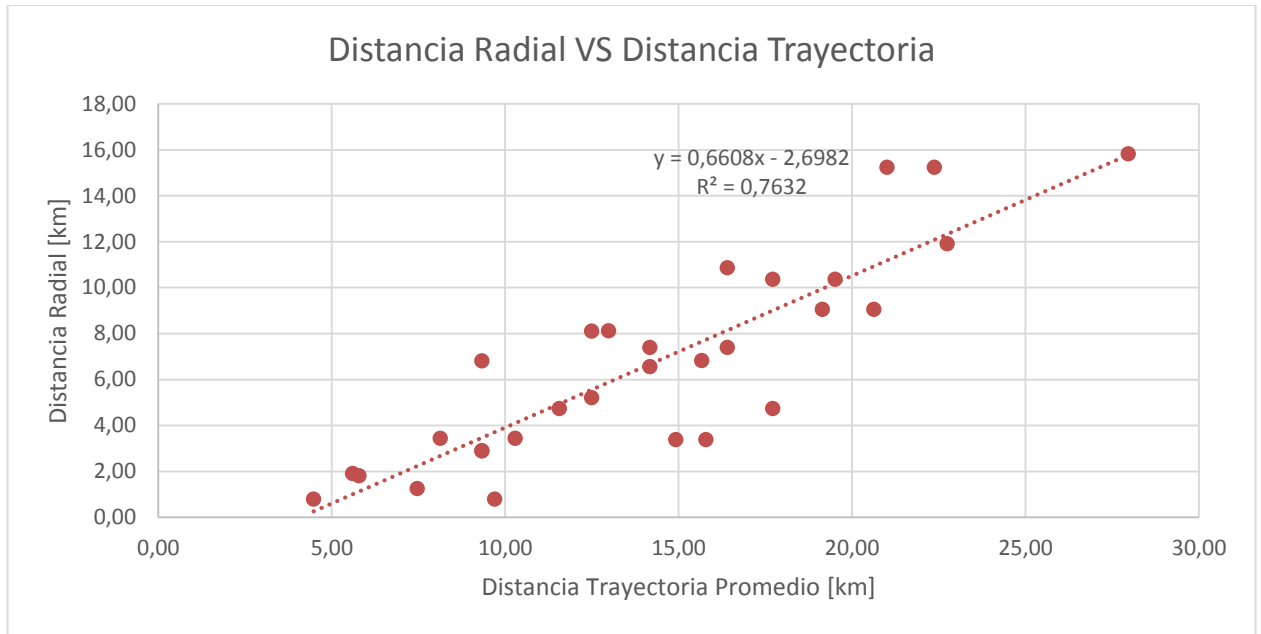


Gráfico 12 Correlación Lineal entre la Distancia Radial y la Distancia de Trayectoria

La ecuación de la línea recta que se ajusta a la serie de datos es

$$y(x) = 0.6608x - 2.6982$$

La forma en que se planteó la ecuación permite obtener a partir de una distancia asociada a una cantidad temporal las distancias radiales asociadas a las curvas isócronas aproximadas. El mencionado análisis se observa en la siguiente tabla:

Tabla 10 Distancias Radiales para Isócronas Aproximadas después del Análisis de Regresión Lineal para una Velocidad Promedio de 22.37 [km/h]

Duración Isócronas [min]	Distancia Trayectoria Isócronas [km]	Distancia Radial Isócronas [km]
15	5,59	1,00
30	11,18	4,69
45	16,78	8,39
60	22,37	12,08
90	33,55	19,47
120	44,74	26,86

En la primera columna de la tabla anterior se tiene la duración para ciertos valores de Isócronas definidas para el estudio, en la segunda columna se hallan los valores para la distancia de la trayectoria asociada a las isócronas obtenidas al multiplicar cada duración de las isócronas (después de la adecuada conversión de unidades) por la velocidad promedio general obtenida del estudio. Por último, en la tercera columna se halla la distancia radial asociada a cada línea isócrona utilizando la ecuación obtenida en el análisis de regresión lineal:

$$Dist\ Radial(Dist\ Trayec) = 0.6608(Dist\ Trayec) - 2.6982$$

El resultado de dicho análisis se visualiza mejor en el Sistema de Información Geográfico:

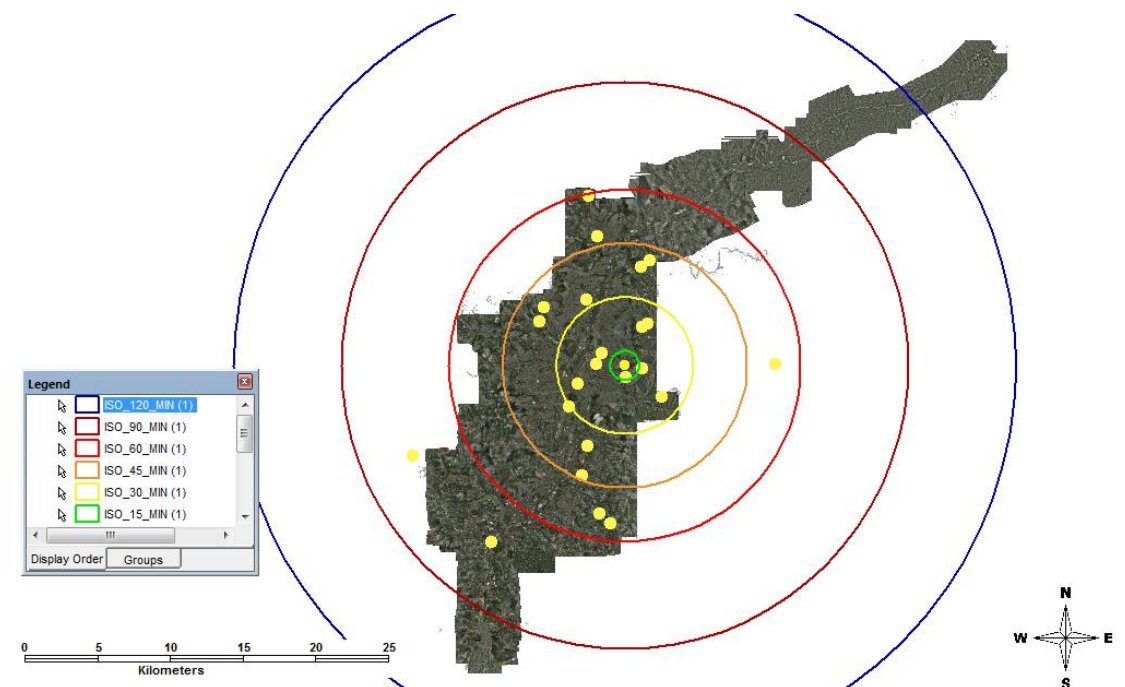


Gráfico 13 Isócronas Aproximadas a partir de la Regresión Lineal con Origen en Villahermosa

En el gráfico anterior se observa, según las leyendas, las isócronas para cada duración de tiempo correspondiente, bien sea cada 15, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos. Hay que tener presente de nuevo que dichas isócronas son aproximaciones a la variable estudiada, puesto que no

deberían ser necesariamente simétricas en todas las direcciones (Circulares) pero demuestran, para el alcance y objetivo de este proyecto, la afectación de la movilidad para la zona de interés asociada al Contrato de Mantenimiento de la Unidad Operación y Mantenimiento Provisión Aguas.

11 Sobrecostos asociados a una ineficiente utilización del recurso humano en el desarrollo de las actividades contratadas teniendo en cuenta las variables de productividad y tiempos de desplazamiento hallados en este trabajo

Para analizar los sobrecostos asociados a la baja productividad del recurso humano en función de la productividad y los tiempos de desplazamientos, se realizó el análisis de los costos directos del contrato objeto de este estudio y del cual se tomaron las mediciones en campo y los costos directos del presupuesto de referencia estimado por EPM para el proceso de contratación que dio origen al mismo.

Por tratarse de información clasificada que puede brindar ventajas a la hora de presentar ofertas para procesos de contratación con EPM para las personas que accedan a ella, en este capítulo se harán los análisis en porcentajes y no se presentarán valores de contratación y/o de presupuestos de referencia.

Al analizar los costos directos presentados y aceptados para el contrato de mantenimiento que hizo parte del trabajo investigativo se obtuvo la siguiente desagregación:

Tabla 11 Análisis componentes costos directos contrato mantenimiento

Componente	Porcentaje
Transporte	37,29%
Mano de obra	38,95%

Como se aprecia en la tabla 9, los componentes que más valor le aportan a los costos directos de la oferta analizada son la mano de obra con el 38,95% y el transporte con el 37,29%, ambos suman el 76,24% del total del costo directo.

Cuando se hace el mismo análisis para el presupuesto de referencia que EPM estimó para el proceso de contratación que dio origen al contrato analizado, se encontró:

Tabla 12 Análisis componentes costos directos presupuesto de referencia EPM

Componente	Porcentaje
Transporte	27,26%
Mano de obra	19,12%

Para el caso del presupuesto de referencia de EPM, se evidencia que tanto la mano de obra como el transporte presentan porcentajes muy inferiores a los presentados por el contratista con un 19,12% y 27,26% respectivamente y que ambos aportan el 46,38% del costo directo.

En la siguiente tabla se observa la diferencia en términos porcentuales de los costos directos estimados por el contratista y los estimados por EPM:

Tabla 13 Comparativo costos directos contratista y costos directos EPM

Componente CD	Porcentaje		Diferencia porcentual
	EPM	Contratista	
Transporte	27,26%	37,29%	10,03%
Mano de obra	19,12%	38,95%	19,83%

Se observa que la mano de obra presenta una desviación en términos porcentuales cercana al 20%, al ser contrastado este resultado con el obtenido en el capítulo 8 donde se halló que el Coeficiente de Productividad (C_p) actual del contratista es del 36,17% y el óptimo según la literatura consultada es del 60%, es decir se tiene un déficit en productividad del 23,83 % porcentaje muy similar a la diferencia del análisis de los costos directos, evidenciando que la baja productividad está siendo cargada por los contratistas en sus costos directos, transfiriendo su ineficiencia a la empresa contratante.

En otras palabras, se puede afirmar que existe un sobre costo asociado a la baja productividad del contratista cercano al 20% dado que este valor se obtuvo tanto en el análisis de productividad (23,83%) como en el análisis de distribución de costos directos (19,83%).

En el pliego de condiciones y especificaciones técnicas estipula que la firma contratista una vez se le comunique la aceptación de la oferta, debe establecer un centro de despacho de cuadrillas, desde la cual se direcciona al personal, herramientas, equipos y vehículos hacia los diferentes frentes de obra del sistema de acueducto que requieren mantenimiento y que están ubicados de una manera dispersa sobre todo el área metropolitana.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el capítulo 10, donde se halló que el tiempo promedio de desplazamiento es de 47 minutos y partiendo de la hipótesis que una cuadrilla en el día se desplaza mínimo 2 veces, bien sea del centro de despacho al lugar de las obras o entre obras, se tiene:

$$TDD = TPM * n$$

Donde:

TDD es el Tiempo Diario de Desplazamiento

TPM es el Tiempo Promedio de Desplazamiento hallado en el capítulo 10

N es el número de desplazamientos diarios

$$TDD = 47 \text{ min} * 2 \rightarrow TDD = 94 \text{ min}$$

Teniendo en cuenta que el horario definido por el contratista para su personal operativo es de lunes a viernes de 7:00 am a 5:30 pm con una hora de almuerzo se tiene que en un día laboral

el empleado tiene una jornada efectiva de trabajo de 9,5 horas lo que corresponde a 570 minutos, al hacer la relación porcentual del tiempo empleado para desplazamientos se tiene que el 15,67% de la jornada de trabajo se invierte en el transporte del personal a los frentes de trabajo.

Este tiempo encaja perfectamente en la definición de tiempo contributivo ya que es necesario para la ejecución del trabajo, pero no aporta unidades constructivas y no hizo parte del análisis de productividad, dado que no se ajustaba a la metodología de los 5 minutos, definida para este trabajo de campo.

Para la elaboración de los presupuestos de referencia de EPM, esta variable de tiempo contributivo asociada al transporte del personal equipos y herramientas, no se tenía considerada en la estructura de costos, por lo que se deberá incluir ya que es un porcentaje significativo que aumenta la brecha de las propuestas de los contratistas con el de referencia EPM.

Es importante aclarar que para el análisis de productividad se tuvo en cuenta solo el tiempo que el personal estaba en los frentes de trabajo, es decir la productividad se midió una vez las cuadrillas llegaban a los lugares de ejecución de las actividades, por ende, el costo de la mano de obra relacionada con el tiempo contributivo inherente al transporte del personal no se consideró en esa parte del trabajo y por consiguiente es totalmente válido incluirlas en este capítulo del trabajo como un costo a considerar.

Al evaluar las dos variables analizada en este capítulo, se halla el tiempo efectivo de trabajo diario de un empleado para este tipo de contratos:

$$TETD = (TJLD - TDD) * C_P$$

Donde:

TETD es el Tiempo Efectivos de Trabajo Diario expresado en minutos

TJLD es el Tiempo de la Jornada Laboral Diaria expresado en minutos

TDD es el Tiempo Diario de Desplazamiento expresado en minutos

C_p es el Coeficiente de Productividad hallado en el capítulo 8

$$TETD = (570 \text{ min} - 94 \text{ min}) * 36,17\% \Rightarrow TETD = 172,17 \text{ min}$$

$$TETD = 172,17 \text{ min} * \frac{1 [h]}{60 [min]} = 2,87 \text{ horas}$$

12 Consideraciones finales y recomendaciones

Una vez realizada la investigación documental sobre temas relacionados con la problemática que dio origen al presente trabajo, sumado a la experiencia del autor en lo referente al tema, se partió de la hipótesis que la mano de obra y el transporte eran las variables que más incidían en la diferencia de los valores de las ofertas económicas presentadas por las firmas contratistas con los costos de referencia de EPM para atender las necesidades de mantenimiento correctivo del sistema de distribución de Acueducto, hipótesis que fue plenamente validada en el desarrollo del trabajo.

Se espera que, a partir de este estudio y teniendo en cuenta que el autor es funcionario de EPM, sean incluidos en la elaboración de los presupuestos para los contratos de mantenimiento de redes de distribución de acueducto, los costos asociados con la productividad de los contratistas y el transporte del personal, materiales y equipos; además que este trabajo, sirva de referente al interior de la empresa para contratos de mantenimiento de otros negocios con el de recolección de aguas residuales y la distribución de gas natural, lo anterior debido a la similitud de trabajos de mantenimiento de estas redes respecto a las de acueducto.

Se recomienda realizar la socialización de los resultados del capítulo de productividad con las firmas contratistas más recurrentes en la presentación de ofertas para este tipo de contratos, con el fin de concientizarlos de las pérdidas asociadas a la baja productividad, generadas por una deficiente gestión en la administración de los recursos, que se materializan en sobrecostos que son cargados a la empresa contratante, en este caso EPM.

Se sugiere que EPM solicite a las firmas contratistas, la implementación de controles y estrategias que permitan reducir los tiempos no contributivos en el desarrollo de las actividades

de mantenimiento de redes de acueducto, lo que supone una reducción en los costos operativos para los contratista y precios mas competitivos y favorables para los intereses de EPM.

Se recomienda realizar actualizaciones periódicas del estudio de movilidad, preferiblemente cada año, dado que el parque automotor del Área Metropolitana esta creciendo dramáticamente y las vías no tienen un desarrollo en igual proporción, lo que supone a corto plazo condiciones de movilidad menos favorables y en consecuencia un mayor valor en tiempo y dinero, asociado al transporte del personal, materiales y equipos para la ejecución de las actividades.

A nivel de productividad y rendimientos de mano de obra, se sugiere continuar con la recolección de datos y procesamiento de la información dado que este estudio sirve de punto de partida para nuevos estudios que permitan evaluar la evolución y eficacia de las acciones implementadas a raíz de los resultados obtenidos.

Por último, se sugiere realizar un estudio análogo para el análisis de la administración de los contratos (costos indirectos) para detectar diferencias sustanciales entre las ofertas económicas presentadas por las firmas contratistas y la calculada por EPM en los presupuestos de referencia.

13 Referencias Bibliográficas

- ACIEM. (15 de Junio de 2017). *www.aciem.org*. Obtenido de http://www.aciem.org/home/images/CDN/CGMC_ACIEM/Guia_Fundamentos.pdf
- Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. (2017). Reporte de Sostenibilidad 2016. *www.acuacar.com*, pp.46-61.
- Al-Aomar, R. (2012). Analysis of lean construction practices at Abu Dhabi construction industry. *Lean Construction Journal*, pp 105-121.
- Arboleda, S. (2014). Análisis de Productividad, Rendimientos y Consumo de Mano de Obra en Procesos Constructivos, Elemento Fundamental en la Fase de Planeación. (*Tesis de maestría*). *Universidad Nacional de Colombia*, pp. 80.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá & UPB. (2007). Estudio de la forma y el crecimiento urbano de la región metropolitana. *Fase I: Mapificación del crecimiento urbano del Valle de Aburrá*.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2013). *Evolución de las empresas de agua y saneamiento de Medellín y Cali en Colombia: ¿vidas paralelas?* Banco Interamericano de Desarrollo.
- Banco Mundial. (14 de Marzo de 2017). *www.bancomundial.org*. Obtenido de [www.bancomundial.org: http://www.bancomundial.org/es/results/2013/04/15/water-resources-management-results-profile](http://www.bancomundial.org/es/results/2013/04/15/water-resources-management-results-profile)
- Boscheck, R. (2013). The Regulation of Water Services in the EU. *Intereconomics* , pp 136-158.

- Botero, L, & Álvarez M. (2004). Guía de mejoramiento continuo para la productividad en la construcción de proyectos de vivienda (Lean Construction como estrategia de Mejoramiento). *REVISTA Universidad EAFIT*, pp. 50-64.
- Botero, L. (2002). Análisis de Rendimientos y consumos de mano de obra en actividades de construcción. *REVISTA Universidad EAFIT*, pp. 9-21.
- Buchhold, V. (2015). Fast Computation of Isochrones in Road Networks. (*Tesis de Maestría*). *Karlsruhe Institute of Technology-University of the State of Baden-Wuerttemberg and National Research Center of Helmholtz Association. Karlsruhe.*
- CARE Internacional-Avina. (2012). *Módulo 5. Operación y mantenimiento de sistemas de agua potable*. Ecuador.
- Chang, S, & Son, J. (2014). The Productivity Improvement for Steel Framing Work Efficiency by Work Sampling and 5-minute Rating Technique. *KICEM Journal of Construction Engineering and Project Management, Online*, pp. 40-46.
- Colombia Compra Eficiente. (11 de 03 de 2017). <https://www.colombiacompra.gov.co>. Obtenido de <https://www.colombiacompra.gov.co/colombia-compra/colombia-compra-eficiente>: <https://www.colombiacompra.gov.co/colombia-compra/colombia-compra-eficiente>
- Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Basico. (2014). 20 Años. Regulación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo en Colombia. *Revista CRA*.
- Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios. (25 de Junio de 2013). Inspección, Evaluación y Mantenimiento de Ductos Submarinos.

CONAGUA Comisión Nacional del Agua . (2016). Programa Presupuestario: E001 Operación y Mantenimiento de Infraestructura Hídrica. *Diagnóstico de Programas Presupuestarios a incluirse en el PPEF 2016*, 6.

Consorcio Plan Maestro Bolívar. (Febrero de 2010). MANUAL DE OPERACION Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO. *ELABORACION DE LOS PLANES MAESTROS DE LOS SISTEMAS DE ACUEDUCTO DE LOS MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE BOLIVAR GRUPO 1 Y GRUPO 2*. Cartagena, Bolivar, Colombia.

Dekking, F. K. (2005). *A Modern Introduction to Probability and Statistics, Understanding Why and How*. London: Springer-Verlag.

Dorwin, D. (2004). Outsourcing: Past, Present and Future.

<https://courses.cs.washington.edu/courses/csep590/04au/clearedprojects/Dorwin.pdf>, 35.

El País. (28 de 01 de 2016). La gigantesca deuda que no deja dormir a la gerente de Emcali.

<http://www.elpais.com.co>, págs. <http://www.elpais.com.co/calila-gigantesca-deuda-que-no-deja-dormir-a-la-gerente-de-em.html>.

Government of India. (2013). Operation and Maintenance Manual for Rural Water Supplies.

Ministry of Drinking Water and Sanitation, 1.

Government of Newfoundland and Labrador, Prepared by: Conestoga-Rovers & Associates.

(2010). Study on Operation and Maintenance of Drinking Water Infrastructure in Newfoundland and Labrador. *Worldwide Engineering , Environmental , Construction, and IT Services*, pp. 75.

Grossman, G. & Helpman, E. (2005). Outsourcing in a Global Economy. *Review of Economic Studies*, pp. 135–159.

GRUPO TAR ESCUELA UNIVERSITARIA POLITECNICA DE SEVILLA. (03 de 05 de 2017). *TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA*. Obtenido de [http://www.elaguapotable.com/Tratamiento%20de%20potabilizacion%20del%20agua%20\(Grupos%20TAR\).pdf](http://www.elaguapotable.com/Tratamiento%20de%20potabilizacion%20del%20agua%20(Grupos%20TAR).pdf)

Guisado, H. (2013). Tercerización de los servicios públicos. Análisis de la intervención administrativa en Quibdó para el caso acueducto, alcantarillado y aseo. *Maestría en Gobierno y Políticas Públicas*, pp. 43.

Gutierrez, E. R., Lizcano, J. A., & Chacón, G. (11 de 7 de 2012). *Una vision histórica de los servicios públicos*. Obtenido de <http://www.ambientalex.info>: <http://www.ambientalex.info/revistas/rtvol8n120119.pdf>

Hasuka, H. e. (2015). Operation & Maintenance and Service Solutions for Water Utilities Based on Public-private Partnerships. *Hitachi Review Vol. 64 (2015), No. 9*, PP. 585-590.

Hernández, C. (2007). Apoyo en el estudio sobre la medición de productividad y rendimientos, consumo de materiales, mano de obra y equipos utilizados para la ejecución de actividades, basado en el análisis por precios unitarios. *Trabajo de Grado*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Hu, J, Cheng, Z, Zhong, G, & Huang Z. (2013). A Calculation Method and Its Application of Bus Isochrones. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, pp. 99-104.

- I. Loera, G. Espinosa, C. Enríquez, & J. Rodríguez. (2013). Productivity in Construction and Industrial Maintenance. *Procedia Engineering*, 2.
- Indra Sistemas, S.A. (S.F.). Oferta de soluciones y servicios para la Gestión del Ciclo Integral del Agua. *Generando Valor para las Empresas del Agua*, pp. 50.
- Innerebner, M. (2012). Isochrones in Multimodal Spatial Networks. (*Tesis Doctoral*). *Universitas Studiorum Bauzanensis. Bolzano, Italia*.
- Kingdom, B., Liemberger, R., & Marin, P. (2006). The Challenge of Reducing Non-Revenue (NRW) in Developing Countries. *WATER SUPPLY AND SANITATION SECTOR BOARD DISCUSSION PAPER SERIES*, 12.
- Linares, L. O. (Septiembre de 2012). Del Mantenimiento Correctivo al Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
- Mahecha, L. (2010). Análisis comparativo del rendimiento de la mano de obra en la construcción de un edificio. (*Trabajo de Grado*). *Pontificia Universidad Javeriana*, .
- Mainstream Management . (2012). Reshoring 101: Rebuilding U.S. Manufacturing through Right Sizing and Right Shoring. *Thought Leadership Report*.
- Mora, D. (4 de Enero de 2014). Los acueductos en la historia. *La Nacion*.
- Naciones Unidas. (2016). *Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016*. Paris: UNESCO CLD.

ONU. (Noviembre de 2002). *UNITED NATIONS HUMAN RIGHTS*. Obtenido de UNITED NATIONS HUMAN RIGHTS:

www.ohchr.org/Documents/Publications/FactSheet35sp.pdf

Organización Panamericana de la Salud. (2004). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA EL DISEÑO DE CAPTACIONES POR GRAVEDAD DE AGUAS SUPERFICIALES*. Lima.

PAVCO. (15 de Junio de 2017). <https://pavco.com.co>. Obtenido de

<https://pavco.com.co/2/renovacion-zinzanja/4-192/i/192>

Porras, H, Sánchez, O, & Guerra, J. (2014). Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual. *AVANCES Investigación en Ingeniería*, pp. 32-53.

RAS. (2010). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO B. Bogota D.C., Colombia.

Remolina, A, & Polanco, L.M. (2014). Estudio de rendimientos para las actividades estructura y mampostería para un proyecto de construcción en el campus de la UPB. *Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga*, pp. 105-112.

Róka Madarász, L., Mályusz, L., & Tuczai, P. (2016). Benchmarking facilities operation and maintenance management using CAFM database: Data analysis and new results. *Journal of Building Engineering*, 1.

Romero, A. (10 de 03 de 2017). *Gestiopolis*. Obtenido de <https://www.gestiopolis.com>:

<https://www.gestiopolis.com/outsourcing-que-es-y-como-se-aplica/>

- Rozo, J. (25 de 02 de 2017). *Participación privada y desarrollo empresarial en los servicios de acueducto y alcantarillado en Colombia: ¿Cuándo, cómo y dónde*. Obtenido de www.plataformacontralaprivatizaciondelcyii.org:
www.plataformacontralaprivatizaciondelcyii.org
- Samad, T. (2012). Sistema de Ciudades. Una Aproximación visual al caso colombiano. *Banco Mundial, Departamento Nacional de Planeación DNP*, 46.
- Schulz, T. (2013). Man vs. Machine Are Any Jobs Safe from Innovation? . *Der Spiegel* ,
<http://www.spiegel.de/international/business/speed-of-innovation-and-automation-threatens-global-labor-market-a-897412-2.html>.
- Superservicios. (2015). *Informe Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado*. Bogota D.C.
- The Water Resources Group. (2012). *Informe preparado para El Foro Económico Mundial, Reunión anual 2012*. Davos.
- TOYOTA. (28 de 02 de 2017). *Toyota Production System*. Obtenido de <http://www.toyota-global.com>: http://www.toyota-global.com/company/vision_philosophy/toyota_production_system/
- U.S. Fire Administration & Hickey, H. (2008). *Water Supply Systems and Evaluation Methods*. U.S.A: Volume I: Water Supply System Concepts.
- UNESCO. (2015). *AGUA PARA UN MUNDO SOSTENIBLE*. Perusa.
- UNICEF y OMS. (2015). *Progress on Sanitation and Drinking Water*. UNICEF.

United Nations . (2011). *World Urbanization Prospects The 2011 Revision*. New York: United Nations.

Weinert, S., & Meyer, K. (2005). The Evolution of IT Outsourcing. *Arbeitspapiere des Fachbereichs Wirtschafts- und Sozialwissenschaften*.



FORMATO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO DE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CONTRATISTAS



ACTIVIDAD 1

ACTIVIDAD _____
 HERRAMIENTAS _____
 EQUIPO _____

ACTIVIDAD 2

ACTIVIDAD _____
 HERRAMIENTAS _____
 EQUIPO _____

ACTIVIDAD 3

ACTIVIDAD _____
 HERRAMIENTAS _____
 EQUIPO _____

CAUSAS TNC

- 1 Esperas
- 2 Necesidades Fisiológicas
- 3 Descanso
- 4 Tiempo Ocioso
- 5 Reprocesos
- 6 Desplazamientos

TP

Tiempo Productivo

TC Tiempo Contributivo
TNC Tiempo No-Contributivo

Apéndice 1 Formato Definitivo de Toma de Datos de Productividad

